OPERON
Edukacja jest podróżą

Ciekawi świata 2

DO NOWEJ PODSTAWY PROGRAMOWEJ

BIOLOGIA

PODRĘCZNIK
ZAKRES
ROZSZERZONY

SZKOŁY PONADGIMNAZJALNE



PODRĘCZNIK INSPIROWANY POSTACIĄ
FRANÇOIS JACOBA
LAUREATA NAGRODY NOBLA Z 1965 ROKU

BIOLOGIA 2

ZAKRES ROZSZERZONY

Sebastian Grabowski • Kamil Kulpiński

PODRĘCZNIK
DLA SZKÓŁ PONADGIMNAZJALNYCH

OPERON
Edukacja jest podróżą
2013

WSTĘP

Podręcznik *Biologia 2. Zakres rozszerzony* to drugi tom z trzytomowej serii podręczników do biologii w zakresie rozszerzonym dla uczniów szkół ponadgimnazjalnych. Podręcznik jest częścią pakietu edukacyjnego, w którego skład wchodzą: program nauczania, książka dla nauczyciela ze scenariuszami lekcji i testami sprawdzającymi, zestaw testów przygotowujących do matury oraz filmy edukacyjne. Wszystkie elementy tego zestawu są ze sobą ściśle zintegrowane i pozwalają na pełne wykorzystanie nowoczesnych metod dydaktycznych w nauczaniu biologii.

W niniejszym tomie autorzy prezentują treści z zakresu metabolizmu oraz budowy i fizjologii organizmu człowieka. Szczególny nacisk położono na omówienie budowy i funkcjonowania poszczególnych układów. Ponadto przedstawiono niektóre choroby współcześnie dotykające człowieka oraz ich profilaktykę.

Przejrzysta i uporządkowana struktura podręcznika ułatwia zrozumienie i zapamiętanie prezentowanych treści. Problematyka omawiana w każdym rozdziale została ujęta w formę bogato ilustrowanego krótkiego wykładu, urozmaicanego doświadczeniami i ciekawostkami stanowiącymi często informacje pozaprogramowe. Podsumowania znajdujące się pod koniec każdego rozdziału zawierają syntezę zawartych w nim informacji. Zamieszczone polecenia umożliwiają uczniom utrwalenie wiadomości i służą sprawdzeniu stopnia opanowania przez nich omawianych treści. Propozycje lektur oraz stron WWW służą poszerzeniu wiedzy z danego tematu, zdobyciu dodatkowych, ciekawych informacji, a także pomagają rozwinąć zainteresowania biologiczne. Proces nauczania z pewnością wzbogacą przykładowe zadania maturalne umieszczone po każdym dziale, dostosowane do nowej formuły egzaminu dojrzałości. Korzystanie z podręcznika ułatwia indeks, znajdujący się na końcu książki.

Prosimy o nadsyłanie pod adresem Wydawnictwa wszelkich uwag i sugestii. Będą one niezwykle przydatne w pracach nad kolejnymi wydaniami książki. Uczniom życzymy, aby praca z podręcznikiem przyczyniła się do wielu sukcesów w nauce.

Objaśnienia piktogramów



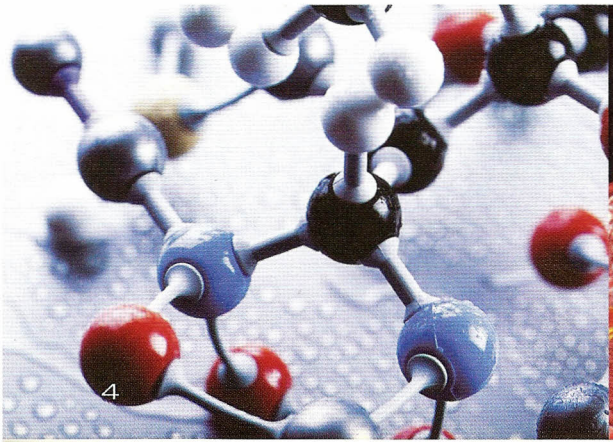
SPIS TREŚCI

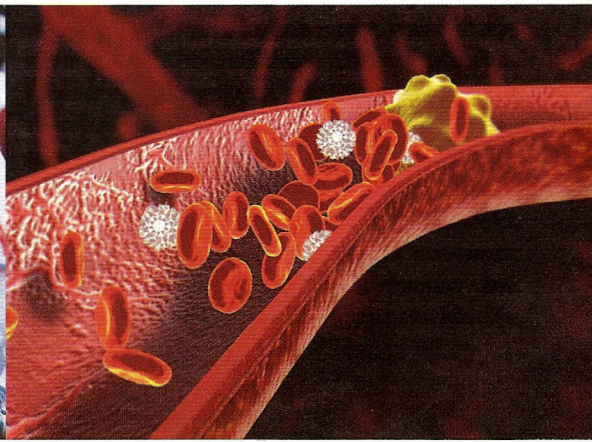
METABOLIZM

1 | ENZYMY 8
2 | PRZEBIEG REAKCJI ENZYMATYCZNYCH 14
3 | REGULACJA AKTYWNOŚCI ENZYMÓW. RYBOZYMY 19
4 | PRZENOŚNIKI ENERGII 24
5 | INNE UNIWERSALNE PRZENOŚNIKI 29
6 | SZLAKI METABOLICZNE. KATABOLIZM I ANABOLIZM 33
7 | ODDYCHANIE KOMÓRKOWE. GLIKOLIZA 37
8 | METABOLIZM PIROGRONIANU 42
9 | CYKL KREBSA 48
10 | FOSFORYLACJA OKSYDACYJNA: ŁAŃCUCH ODDECHOWY 53
11 | METABOLIZM KWASÓW TŁUSZCZOWYCH 59
12 | METABOLIZM AMINOKWASÓW 63
13 | WPROWADZENIE DO FOTOSYNTEZY 68
14 | FAZA JASNA FOTOSYNTEZY 74
15 | FAZA CIEMNA FOTOSYNTEZY 79
16 | CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA INTENSYWNOŚĆ FOTOSYNTEZY 84
17 | CHEMOSYNTEZA 92
18 | GOSPODARKA WODNA ROŚLIN 96
19 | GOSPODARKA MINERALNA I TRANSPORT SUBSTANCJI ORGANICZNYCH W ROŚLINIE 102
20 | RUCHY ROŚLIN 106
21 | HORMONY ROŚLINNE. FOTOPERIODYZM 112

BUDOWA I FUNKCJONOWANIE ORGANIZMU CZŁOWIEKA

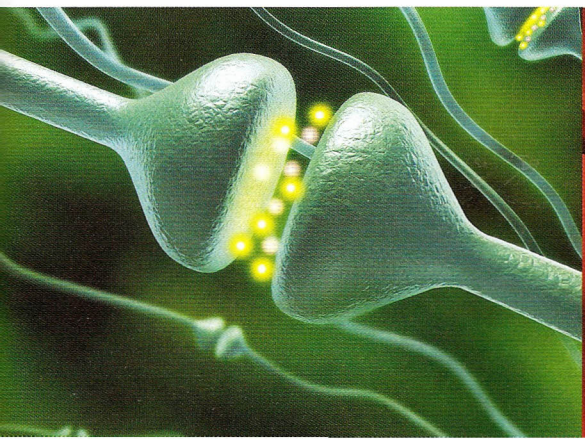
22 | UKŁADY NARZĄDÓW CZŁOWIEKA I ICH TKANKOWA BUDOWA 128
23 | HOMEOSTAZA ORGANIZMU CZŁOWIEKA 133
24 | CZYNNIKI ZABURZAJĄCE HOMEOSTAZĘ 139
25 | BUDOWA SZKIELETU CZŁOWIEKA 146
26 | MECHANIZM SKURCZU MIĘŚNIA 158
27 | GŁÓWNE GRUPY MIĘŚNI 164
28 | ENERGIA I AKTYWNOŚĆ FIZYCZNA 170
29 | SKŁADNIKI POKARMOWE – ICH ROLA I ŹRÓDŁA 175
30 | BUDOWA UKŁADU POKARMOWEGO 181

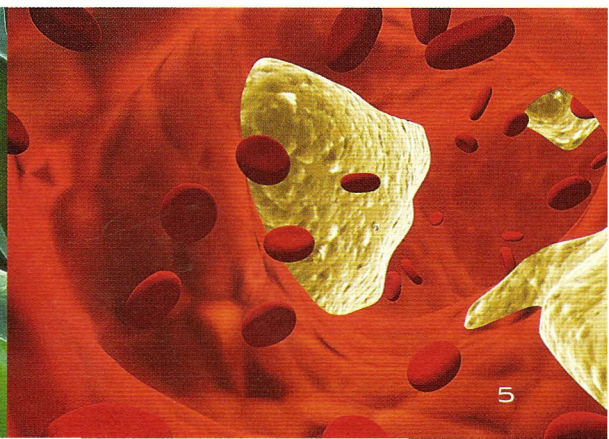


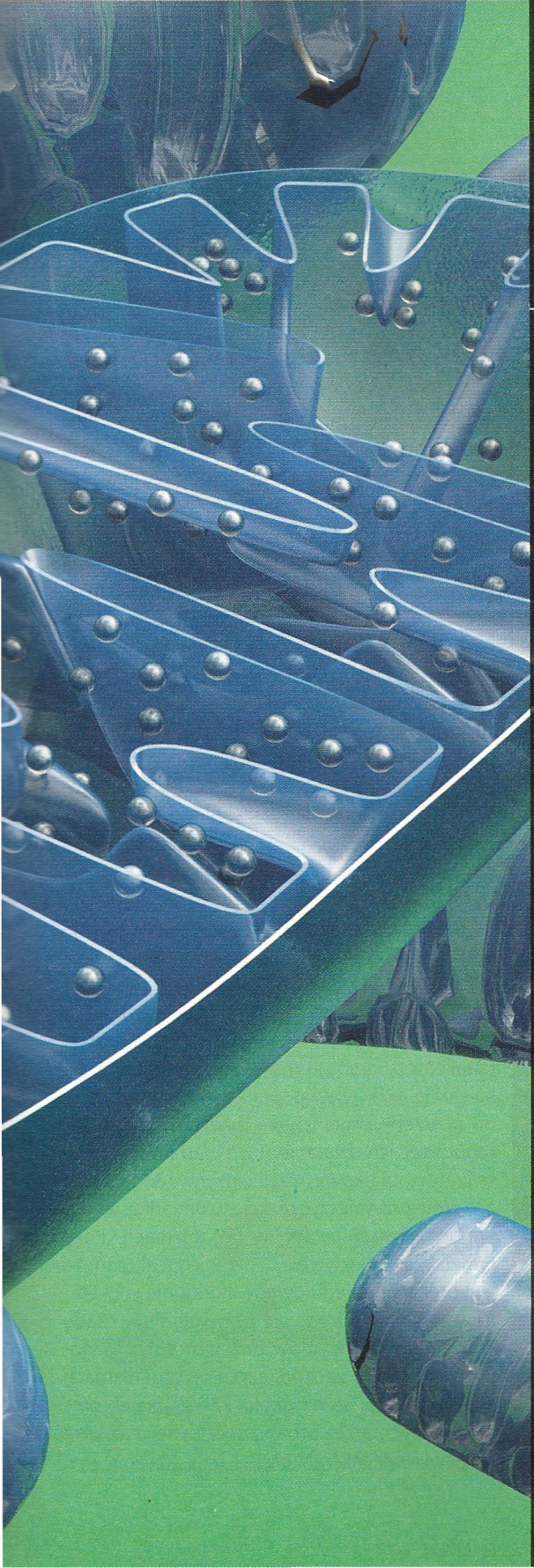


31 | ZAPOTRZEBOWANIE ENERGETYCZNE ORGANIZMU 190
32 | BUDOWA UKŁADU ODDECHOWEGO 194
33 | MECHANIZM WYMIANY GAZOWEJ 199
34 | ZABURZENIA FUNKCJONOWANIA UKŁADU ODDECHOWEGO 205
35 | BUDOWA UKŁADU KRWIONOŚNEGO 211
36 | FUNKCJE KRWI 222
37 | CHOROBY UKŁADU KRWIONOŚNEGO. 229
38 | ELEMENTY UKŁADU ODPORNOŚCIOWEGO 233
39 | REAKCJE ODPORNOŚCIOWE. 237
40 | ZABURZENIA FUNKCJI UKŁADU ODPORNOŚCIOWEGO 245
41 | BUDOWA UKŁADU WYDALNICZEGO 250
42 | MECHANIZM POWSTAWANIA MOCZU 253
43 | CHOROBY NEREK 256
44 | BUDOWA UKŁADU NERWOWEGO 261
45 | PROCES POWSTAWANIA IMPULSU NERWOWEGO. 272
46 | FUNKCJONOWANIE UKŁADU NERWOWEGO ORAZ ŁUK ODRUCHOWY 276
47 | HIGIENA UKŁADU NERWOWEGO I ZNACZENIE SNU. 282
48 | MECHANIZM PERCEPCJI BODŹCÓW. BUDOWA NARZĄDU WZROKU 289
49 | BUDOWA NARZĄDU SŁUCHU. 296
50 | NARZĄD RÓWNOWAGI, ZMYSŁ SMAKU I WĘCHU 299
51 | ZASADY HIGIENY NARZĄDU WZROKU I SŁUCHU 303
52 | BUDOWA I FUNKCJE SKÓRY 306
53 | CHOROBY SKÓRY I PROFILAKTYKA 311
54 | BUDOWA UKŁADU HORMONALNEGO 315
55 | KLASYFIKACJA HORMONÓW 321
56 | ROLA SPRZĘŻEŃ ZWROTNYCH W UKŁADZIE HORMONALNYM 325
57 | REGULACJA HORMONALNA 329
58 | BUDOWA ŻEŃSKIEGO I MĘSKIEGO UKŁADU ROZRODCZEGO 334
59 | PROCES OOGENEZY I SPERMATOGENEZY 338
60 | CYKL MENSTRUACYJNY I FIZJOLOGIA PROCESU ZAPŁODNIENIA. 341
61 | FAZY ROZWOJU ZARODKA I PŁODU 347
62 | ONTOGENEZA CZŁOWIEKA 353
63 | PLANOWANIE RODZINY 357

INDEKS 382







METABOLIZM

1 | Enzymy

2 | Przebieg reakcji enzymatycznych

3 | Regulacja aktywności enzymów. Rybozomy

4 | Przenośniki energii

5 | Inne uniwersalne przenośniki

6 | Szlaki metaboliczne. Katabolizm i anabolizm

7 | Oddychanie komórkowe. Glikoliza

8 | Metabolizm pirogronianu

9 | Cykl Krebsa

10 | Fosforylacja oksydacyjna: łańcuch oddechowy

11 | Metabolizm kwasów tłuszczowych

12 | Metabolizm aminokwasów

13 | Wprowadzenie do fotosyntezy

14 | Faza jasna fotosyntezy

15 | Faza ciemna fotosyntezy

16 | Czynniki wpływające na intensywność fotosyntezy

17 | Chemosynteza

18 | Gospodarka wodna roślin

19 | Gospodarka mineralna i transport substancji organicznych w roślinie

20 | Ruchy roślin

21 | Hormony roślinne. Fotoperiodyzm

1. Enzymy

W organizmach żywych zachodzi wiele różnorodnych reakcji chemicznych. Z powodu stosunkowo niskich temperatur i ciśnienia panującego w komórkach reakcje te mogłyby przebiegać nie dość szybko. Rozwiązaniem tego problemu są **enzymy**, czyli biologiczne **katalizatory**. Dzięki odpowiedniej budowie mogą one znacznie przyspieszyć reakcje, a także przeprowadzać je w sposób selektywny. Umożliwia to regulację procesów chemicznych zachodzących w organizmach.

Rola enzymów

W każdym żywym organizmie zachodzi równocześnie wiele procesów. Są one odpowiedzialne m.in. za jego ruch i wzrost. Budujące organizm komórki również ulegają zmianom, dzieląc się, rosnąc oraz dojrzewając do pełnienia odpowiednich funkcji. Odpowiedzialne za to są modyfikacje w ich wewnętrznych strukturach. Wszystkie te procesy wymagają dostarczenia odpowiednich substancji budulcowych oraz energii. To z kolei jest niemożliwe bez pobierania pokarmu lub wiązania energii świetlnej.

Ogół procesów związanych z przemianami materii i energii wewnątrz organizmów nazywamy metabolizmem. U jego podstawy leży kilka tysięcy reakcji chemicznych. Nawet tak – wydawałoby się – prosty proces jak wykorzystanie sacharozy jako źródła energii wymaga wielu reakcji. Najpierw sacharoza musi ulec hydrolizie do glukozy i fruktozy, a powstałe cukry proste ulegają kolejnym przemianom oraz stopniowemu rozkładowi. Aby zapewnić sprawne funkcjonowanie organizmu, reakcje muszą przebiegać bardzo szybko. Jednak zdecydowana większość reakcji chemicznych w temperaturze pokojowej i pod normalnym ciśnieniem zachodzi wolno. Właśnie dlatego doświadczenia przeprowadza się w warunkach podwyższonego ciśnienia lub podgrzewa się reagujące substancje **(1.1.)**. Ograniczona prędkość reakcji dotyczy również organizmów żywych. Jednak znaczne podwyższenie temperatury ciała w celu przyspieszenia reakcji jest niemożliwe, ponieważ spowodowałoby to denaturację białek i śmierć organizmu.

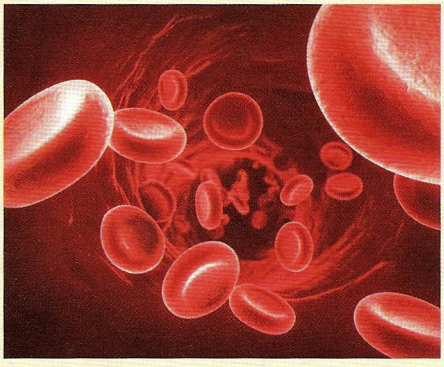


1.1. Ogrzewanie reagentów jest jednym z podstawowych sposobów przyspieszenia przebiegu reakcji chemicznych.

Reakcje przyspiesza też użycie katalizatorów. Są to substancje, które zwiększają szybkość reakcji chemicznych, ale same nie ulegają w nich przemianom. Dzięki katalizatorom do zainicjowania reakcji wystarczają stosunkowo niska temperatura i umiarkowane ciśnienie. Jednak katalizatory nieorganiczne (np. metale) przyspieszają reakcje w stopniu niewystarczającym na potrzeby organizmów żywych, trudno też regulować ich działanie. Tych wad nie mają katalizatory białkowe, czyli enzymy. Mogą one znacznie przyspieszyć reakcje w umiarkowanych warunkach panujących w organizmach. Poza tym działają selektywnie, a przebieg reakcji może być precyzyjnie regulowany. Podobnie jak katalizatory nieorganiczne nie zużywają się w czasie reakcji. Zalety enzymów oraz ogromna różnorodność reakcji zachodzących w organizmach spowodowały, że na około 25000 białek produkowanych przez organizm człowieka aż kilka tysięcy to właśnie enzymy.

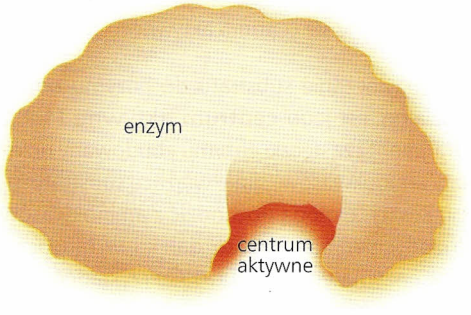
:: Ciekawostka

Niemal wszystkie reakcje w komórkach są katalizowane enzymatycznie. Jeden z najszybszych enzymów to anhydraza węglanowa. W ciągu sekundy jedna jej cząsteczka katalizuje blisko 10^6 (milion!) reakcji łączenia wody z dwutlenkiem węgla. Jest to szybkość dziesięć milionów razy większa niż tej samej reakcji bez katalizatora! Gdyby nie anhydraza węglanowa, niemożliwe byłoby sprawne przenoszenie dwutlenku węgla z komórek ciała do płuc. Dużo anhydrazy węglanowej zawierają erytrocyty.



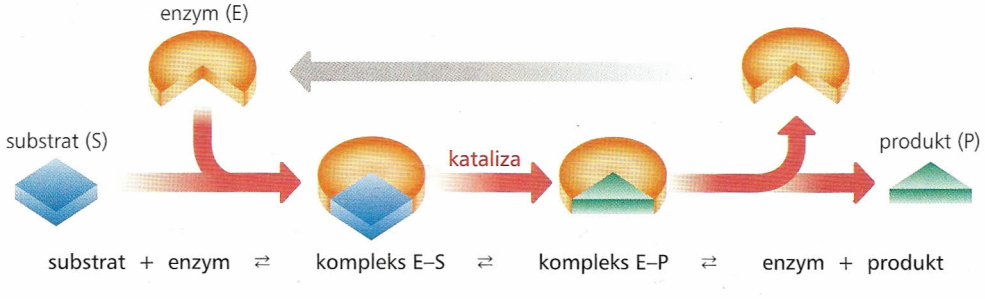
Budowa i właściwości enzymów

Przydatne dla organizmów żywych właściwości enzymów wynikają z ich budowy. Są to duże białka **(1.2.)**, złożone z co najmniej kilkudziesięciu reszt aminokwasowych. W enzymach występuje te same 20 rodzajów aminokwasów co w innych białkach. Umożliwia to znacznie większą różnorodność i plastyczność enzymów, niż gdyby podstawą ich budowy były węglowodany czy lipidy, których elementy strukturalne są mniej zróżnicowane. Dzięki liczbie rodzajów aminokwasów i wielkości cząsteczki enzymu, możliwa jest ogromna liczba kombinacji różnych zestawów aminokwasów w cząsteczce. Budowa i właściwości aminokwasów pozwalają enzymom na reagowanie z różnymi substratami. W aminokwasach występują zarówno reszty hydrofobowe, jak i hydrofilowe, co ułatwia katalizowanie reakcji, w których uczestniczą substraty o określonej polarności. Dodatkowo, dzięki skomplikowanej strukturze tworzonej przez łańcuchy białkowe, możliwe jest lepsze dopasowanie białka enzymatycznego do substancji biorących udział w reakcji.

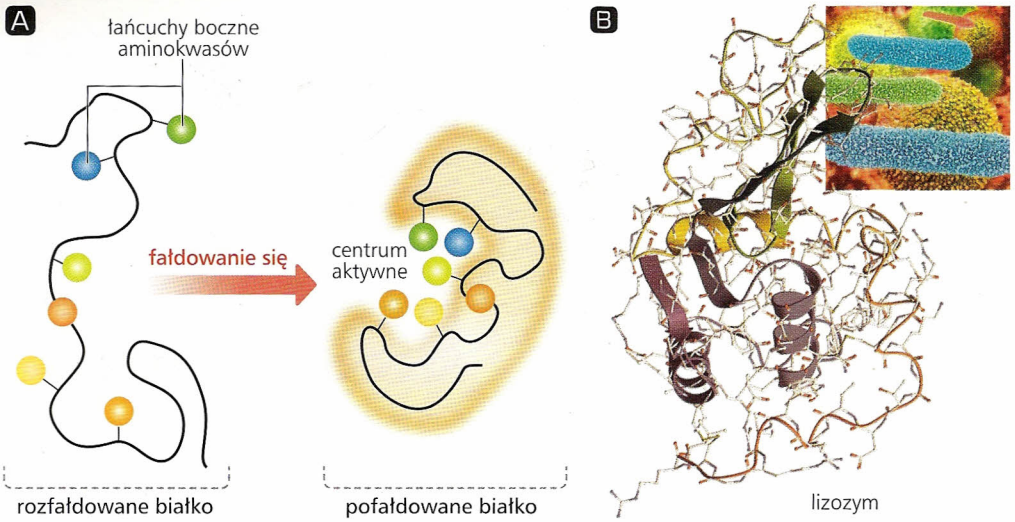


1.2. Model cząsteczki enzymu

Ogólny schemat reakcji enzymatycznej jest zawsze taki sam **(1.3.)**. Substrat łączy się z enzymem i powstaje **kompleks enzym – substrat**. Właściwości enzymu znacznie ułatwiają przemianę substratu w produkt. Gdy do tego dojdzie, produkt odłącza się od enzymu. Enzym powraca do formy pierwotnej, niezmienionej reakcją, w której brał udział. Jest w związku z tym zdolny do przyłączenia kolejnej cząsteczki substratu i przeprowadzenia następnej reakcji.



1.3. Przebieg reakcji katalizowanej przez enzym



1.4. Tworzenie się centrum aktywnego enzymu (A), przykładowa struktura przestrzenna lizozymu (B)

Za przyłączanie substratu do enzymu odpowiedzialne jest jego **centrum aktywne** (1.2.). To fragment cząsteczki enzymu zbudowany przez reszty aminokwasów, silnie wiążące substraty reakcji. Reszty te mogą pochodzić z aminokwasów położonych nawet bardzo daleko w łańcuchu białka enzymatycznego (1.4.). Przykładem jest lizozym, enzym rozkładający ściany komórkowe niektórych bakterii i biorący w ten sposób udział w reakcjach odpornościowych. Jego centrum aktywne jest stosunkowo niewielką częścią enzymu (przypada na nie tylko 6 – niecałe 5% – ze 129 aminokwasów tworzących ten enzym). Nadmiarowe aminokwasy są jednak równie ważne. Odpowiadają za strukturę centrum aktywnego, czyli sposób, w jaki budujące je reszty aminokwasowe są w nim ułożone. Biorą też udział w regulacji aktywności enzymów, którą szerzej omówiono w następnych rozdziałach.

Przyłączenie substratu w centrum aktywnym jest możliwe dzięki oddziaływaniom między atomami budującymi substrat i centrum aktywne. Są to głównie słabe wiązania, jednak występują w dużej ilości. Część z nich pojawia się tylko wtedy, gdy cząsteczka enzymu i substratu bardzo się do siebie zbliżą i są odpowiednio względem siebie ułożone. Ujawnia się tu rola struktury przestrzennej centrum aktywnego, warunkowanej przez całą cząsteczkę enzymu. Struktura centrum aktywnego oraz charakter budujących je aminokwasów powodują też, że dobrze wiąże się z nim tylko jeden rodzaj substratu. Centrum aktywne, a przez to również cały enzym, cechuje więc specyficzność względem przyłączanego substratu. Specyficzność ta jest tak duża, że pozwala odróżnić formy D i L tego samego związku, czyli stereoizomery zbudowane z takich samych atomów ułożonych w tej samej kolejności, ale odmiennie zorientowanych w przestrzeni (np. w związkach będących lustrzanymi odbiciami). Enzymy są w stanie katalizować reakcję tylko jednej, wybranej formy związku – cechy tej nie wykazują katalizatory nieorganiczne. Niektóre enzymy są z kolei w stanie rozpoznać budowę całego łańcucha białkowego i przecinać wiązania peptydowe w pobliżu konkretnego aminokwasu lub też od odpowiedniego końca peptydu, czyli z wolną grupą karboksylową (koniec C) lub grupą aminową (koniec N). Specyficzność wiązania substratu przez enzym wyjaśnia **model klucza i zamka**, zaproponowany przez Emila Fischera. Według tego modelu substrat musi mieć odpowiedni kształt, żeby pasować do centrum aktywnego – tak, jak klucz pasuje do zamka (1.5.). Model ten został jednak uzupełniony, ponieważ enzymy nie są sztywne, a ich kształt często zmienia się pod wpływem substratu. Substrat „wciska się" (lub raczej jest „wciągany" przez enzym) w miejsce aktywne, które odpowiednio się do substratu dopasowuje (1.5.). Można powiedzieć, że enzym jest zamkiem, który dokładnie pasuje do klucza

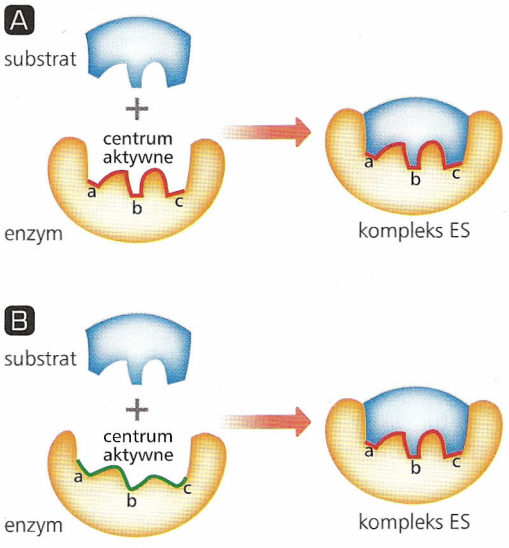
dopiero po jego włożeniu! Ten mechanizm nazwano **indukcyjnym dopasowaniem**.

Wiązanie przez enzym tylko jednego substratu powoduje, że wiele z nich katalizuje tylko jedną reakcję. Jest to ważne dla organizmu, gdyż pozwala na regulowanie metabolizmu poprzez wpływ na działanie poszczególnych enzymów. Co prawda, niektóre enzymy są zdolne do katalizy więcej niż jednej reakcji, ale liczba ta nie przekracza kilku (przykładem jest omawiane w rozdziałach 15. i 16. rubisco biorące udział w fotosyntezie). Katalizatory nieorganiczne uczestniczą natomiast w setkach reakcji i jest to kolejna cecha różniąca je od enzymów.

Koenzymy

Dotychczas mówiliśmy o enzymach zbudowanych tylko z aminokwasów – czyli będących białkami prostymi. Jednak liczba zachodzących w organizmie reakcji biochemicznych jest zbyt duża, by jedynie za pomocą aminokwasów dało się wytworzyć odpowiednio specyficzny enzym dla każdej z nich. Dlatego w wielu enzymach pojawia się część niebiałkowa, zwana **kofaktorem**. Mogą nim być jony metali (np. cynku, żelaza lub miedzi) lub niewielkie związki organiczne. Te ostatnie to tak zwane **koenzymy** (często są nimi pochodne witamin z grupy B). Część białkowa występująca w enzymie zawierającym kofaktor to **apoenzym** (1.6.). Bez kofaktora jest on pozbawiony aktywności enzymatycznej. Enzym złożony z apoenzymu i kofaktora określamy jako **holoenzym**.

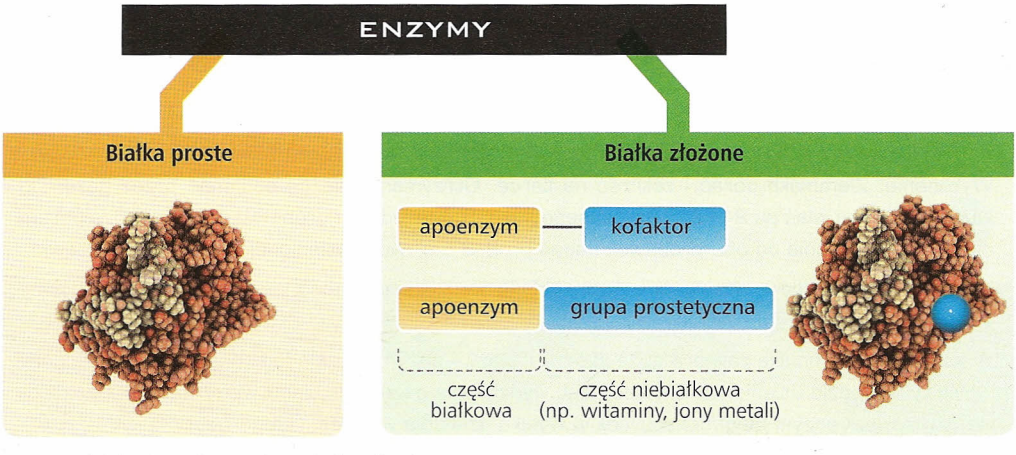
? Określ, w którym modelu podczas wiązania substratu dochodzi do większych zmian struktury enzymu.



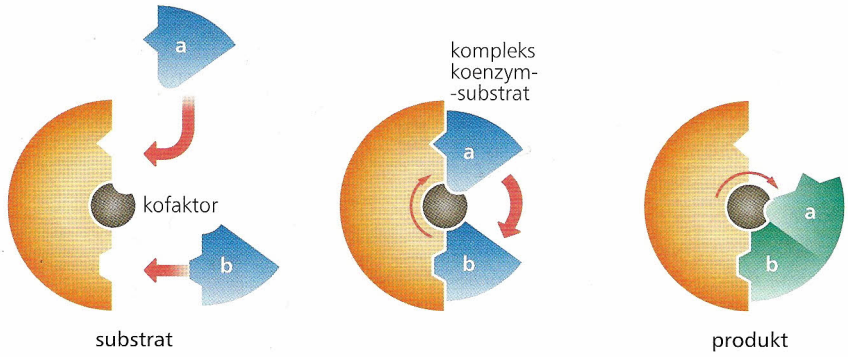
1.5. Model klucza i zamka (A) i model indukcyjnego dopasowania (B)

:: Ciekawostka

Znajomość budowy centrów aktywnych enzymów może zostać wykorzystana w opracowaniu nowych leków. Dzięki wyprodukowaniu cząsteczki, która dokładnie pasuje i wiąże się z centrum aktywnym konkretnego enzymu, możemy modyfikować jego aktywność i wpływać na przemiany zachodzące w komórce.



1.6. Podział enzymów pod względem budowy



1.7. Kofaktor jest elementem centrum aktywnego enzymu – ułatwia przyłączenie substratów i przeprowadzenie reakcji.

W związku z tym, że funkcją kofaktorów jest zwiększanie możliwości łączenia substratów z centrum aktywnym enzymu, zawsze są one częścią **centrum aktywnego** (1.7.). Podobnie jak reszta enzymu, nie zmieniają się w efekcie reakcji, mogą jednak być związane z centrum aktywnym w różnym stopniu. Te, które są związane luźno, mogą opuszczać centrum aktywne, by następnie łączyć się z innym enzymem. W ten sposób jeden kofaktor może uczestniczyć w różnych reakcjach, katalizowanych przez różne enzymy. Charakterystyczne jest to, że enzymy wykorzystujące te same kofaktory zwykle przeprowadzają podobne typy reakcji. Inne kofaktory są z kolei na stałe związane wiązaniami kowalencyjnymi z apoenzymem. Określa się je jako **grupy prostetyczne** (1.6.).

Ze względu na typ przeprowadzanych reakcji enzymy dzieli się na sześć głównych klas, kolejno ponumerowanych oraz odpowiednio nazwanych. Klasy te są podzielone na podklasy w zależności od wiązań, jakie tworzą lub rozkładają, oraz od substratów reakcji. Na przykład katalaza rozkładająca nadtlenek wodoru należy do klasy oksydoreduktaz. Z kolei enzymy trawiące białka (np. proteinazy i inne enzymy trawienne) są przedstawicielami hydrolaz.

Klasy enzymów

Nr	Klasa	Typ przeprowadzanych reakcji
1	oksydoreduktazy	utlenianie i redukcja
2	transferazy	przenoszenie grup funkcyjnych między cząsteczkami
3	hydrolazy	hydroliza wiązań
4	liazy	rozcinanie wiązań w sposób inny niż hydroliza i reakcje utleniania; często prowadzą do powstania wiązań podwójnych
5	izomerazy	izomeryzacje
6	ligazy	łączenie cząsteczek wiązaniami kowalencyjnymi (wymagane jest ATP)

:: Doświadczenie

1. Wykrywanie katalazy w bulwie ziemniaka

Materiały: niewielka bulwa ziemniaka, woda utleniona, tarka, gaza, 2 probówki, palnik

Wykonanie: Ziemniaka obrać i zetrzeć na tarce. Otrzymaną miazgę odcisnąć przez gazę. Do każdej próbówki wlać po 2–3 cm^3 uzyskanego soku. Sok w jednej z próbówek zagotować, a potem ostudzić. Następnie do obu próbówek dodać po 2–3 cm^3 wody utlenionej.

Wyniki: W próbówce z surowym sokiem obficie wydzielają się pęcherzyki gazu. W próbówce z zagotowanym sokiem reakcja nie zachodzi.

Wnioski: Sok ziemniaka zawiera duże ilości katalazy – enzymu rozkładającego nadtlenek wodoru zawarty w wodzie utlenionej. Efektem jest wydzielenie gazowego tlenu. W próbówce z zagotowanym sokiem enzym uległ denaturacji w wyniku działania wysokiej temperatury.

:: Doświadczenie

2. Wykrywanie proteinaz w soku kiwi lub ananasa

Materiały: kiwi lub ananas (owoce świeże, nie konserwowe), galaretki żelatynowe w proszku, naczynia i palnik do przygotowania galaretek

Uwaga: galaretki agarowe są nieodpowiednie do przeprowadzenia doświadczenia.

Wykonanie: Galaretki przygotować zgodnie z przepisem na opakowaniu i rozlać do salaterek (wystarczą warstwy grubości około centymetra). Pozostawić do zastygnięcia (warto to zrobić dzień wcześniej). Następnie na powierzchni galaretek ułożyć plaster ananasa lub kilka plasterków kiwi. Jedną salaterkę pozostawić bez owoców jako próbę kontrolną. Odstawić naczynia na kilka godzin.

Wyniki: W jednej salaterce galaretka rozpuściła się pod wpływem plastrów kiwi oraz ananasa. Próba kontrolna pozostała bez zmian.

Wnioski: Ananasy i kiwi zawierają enzymy trawiące kolagen odpowiedzialny za zastyganie galaretek żelatynowych. Enzymy te to proteinazy – bromelina w ananasie i aktynidyna w kiwi.

PODSUMOWANIE



- Enzymy to katalizatory białkowe, umożliwiające szybkie zachodzenie reakcji w warunkach panujących w organizmach żywych (czyli przy stosunkowo niskich temperaturze i ciśnieniu).
- Cechą enzymów jest bardzo wysoka specyficzność względem przyłączanych substratów i przeprowadzanie zwykle tylko jednej reakcji.
- Za przyłączanie substratu i przeprowadzanie reakcji odpowiedzialne jest centrum aktywne enzymu.
- Niektóre enzymy zawierają oprócz części białkowej kofaktory usprawniające pracę enzymu i niezbędne dla jego funkcjonowania. Mogą to być jony metali lub niewielkie cząsteczki organiczne – koenzymy. Jeśli kofaktory są trwale związane z enzymem, noszą nazwę grup prostetycznych.
- Część białkowa enzymu złożonego z białka i kofaktora to apoenzym. Apoenzym i kofaktor tworzą holoenzym.

ZADANIA



1. Wyjaśnij, dlaczego bez uczestnictwa enzymów reakcje w organizmach zachodziłyby bardzo wolno.
2. Wyjaśnij, jak zbudowane jest centrum aktywne enzymu i jaką funkcję spełnia.
3. Przedstaw najważniejszą różnicę pomiędzy modelem klucza i zamka a modelem indukcyjnego dopasowania.
4. Wyjaśnij pojęcia: *apoenzym*, *kofaktor*, *grupa prostetyczna*, *holoenzym*.

BIBLIOGRAFIA



- Alberts B. i in., *Podstawy biologii komórki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.

W INTERNECIE



- http://www.e-biotechnologia.pl

2. Przebieg reakcji enzymatycznych

Dzięki swojej budowie enzymy wpływają na **kinetykę**, czyli przebieg reakcji chemicznych w czasie. Nie mogą zmienić kierunku zachodzących procesów, jednak znacznie je przyspieszają. Pomimo zdolności do przeprowadzania reakcji w umiarkowanych warunkach (do których są dobrze dostosowane) enzymy wykazują dużą wrażliwość zarówno na nieodpowiednie temperatury, jak też na odbiegające od optymalnych pH i stężenia soli.

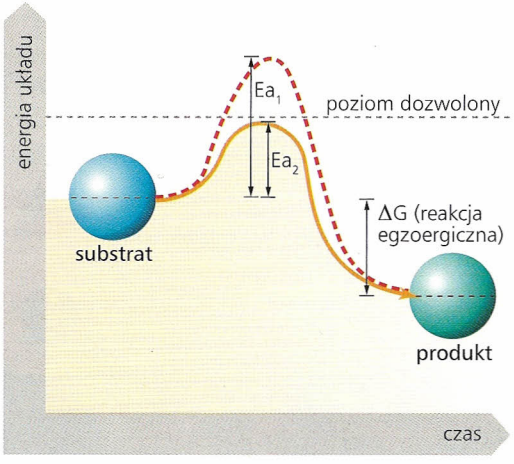
Energia aktywacji

Wykorzystanie enzymów znacznie przyspiesza przebieg reakcji i pozwala na ich wydajne przeprowadzanie w umiarkowanych warunkach panujących w organizmach żywych (czyli przy stosunkowo niskich temperaturze i ciśnieniu). W jaki sposób jest to możliwe?

Jak wiadomo, reakcje można podzielić na egzoergiczne i endoergiczne. Te pierwsze powodują wydzielenie energii i zmniejszają energię swobodną produktów w stosunku do substratów. Reakcje endoergiczne wymagają dostarczenia energii i w efekcie produkty reakcji zawierają jej więcej niż substraty. Reakcje mogą też być sprzężone – wówczas energia wydzielona z reakcji egzoergicznej umożliwia zachodzenie reakcji endoergicznej. W uproszczeniu można stwierdzić, że spontanicznie zachodzą tylko **reakcje egzoergiczne**. Według jednej z podstawowych zasad termodynamiki reakcja zachodzi spontanicznie do momentu, w którym układ osiągnie stan równowagi. Enzymy nie są w stanie wpłynąć na stan równowagi, czyli nie mogą zmienić reakcji endoergicznej w egzoergiczną. Aby przeprowadzić reakcję endoergiczną, potrzebują **energii**. Jej źródłem jest najczęściej ATP (który szerzej omówiono w następnych rozdziałach).

Te mechanizmy, bardzo ważne dla organizmów żywych, nie wyjaśniają jednak, w jaki sposób enzymy przyśpieszają przebieg reakcji. Aby zrozumieć, jak do tego dochodzi, trzeba uwzględnić nie tylko substraty i produkty reakcji, ale też stan przejściowy między nimi. To najbardziej reaktywny stan związków chemicznych biorących udział w reakcji. Ma on wysoką energię swobodną, jest zatem bardzo nietrwały i ulega szybkiej przemianie w produkty. Powstaje wskutek aktywacji substratów, czyli dostarczenia do nich energii, zwanej **energią aktywacji**. Energia ta nie jest uwzględniana w bilansie reakcji, ponieważ najpierw jest dostarczana, a następnie – przy przejściu ze stanu przejściowego do produktu – z powrotem wydzielana. Jak wynika z wykresu **(2.1.)**, po podwyższeniu energii układu związanej ze stanem przejściowym następuje jej obniżenie. Znacznie zmniejsza się też energia produktów w stosunku do substratów. Jest to zatem reakcja egzoergiczna, czyli zachodząca spontanicznie, bez dostarczenia energii. To prostszy przykład, dlatego łatwiej przeanalizować na nim cały proces. Podobnie przebiegają reakcje endoergiczne, z tym że produkty mają wtedy wyższy poziom energetyczny niż substraty.

? Opisz na podstawie wykresu, jak zmienia się energia układu podczas reakcji egzoergicznej.

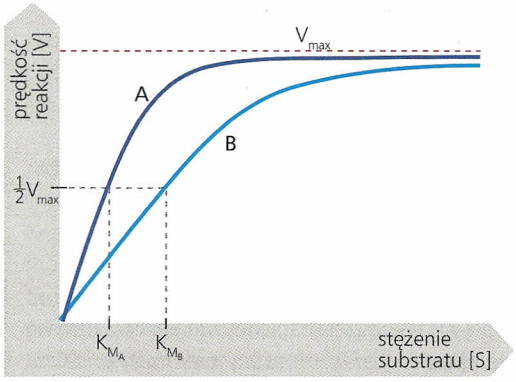


2.1. Zmiany energii układu podczas reakcji egzoergicznej. Ea_1 to energia aktywacji bez udziału enzymów, Ea_2 – z ich udziałem. ΔG to zmiana energii swobodnej między produktami i substratami.

Mimo iż reakcja egzoergiczna zachodzi spontanicznie, jej prędkość zależy od tego, ile cząsteczek substratu osiągnie w określonym czasie ilość energii właściwą dla stanu przejściowego. Po osiągnieciu tego stanu reakcja przebiega już bardzo szybko. Rola enzymów polega zatem na znacznym obniżeniu energii aktywacji reakcji. Obrazowo można powiedzieć, że ułatwiają one pokonanie „górki energetycznej" związanej z powstaniem stanu przejściowego – po prostu ją zmniejszają. Dzieje się tak, ponieważ od centrum aktywnego zależy odpowiednie ustawienie się cząsteczki substratu. Substrat znajduje się też w otoczeniu reszt aminokwasowych o określonych właściwościach (hydrofilowych lub hydrofobowych). Dodatkowo, zgodnie z modelem indukcyjnego dopasowania, enzym i substrat wzajemnie się do siebie dopasowują podczas połączenia. W związku z tym cząsteczka substratu jest w pewnym stopniu deformowana i powstają w niej naprężenia. W takich warunkach nawet niewielka ilość energii może spowodować przemianę i przejście substratu do stanu przejściowego. Enzym nie zmienia zatem kierunku i równowagi reakcji chemicznej, ale obniża energię aktywacji. W ten sposób przyspiesza osiągnięcie stanu równowagi, czyli koniec reakcji.

Kinetyka reakcji enzymatycznych

Kinetyka chemiczna zajmuje się badaniem szybkości i przebiegu reakcji. W przypadku reakcji enzymatycznych mówimy o kinetyce enzymatycznej. Dziedzina ta zajmuje się wpływem enzymów na przyspieszenie reakcji w zależności od różnych czynników. Podstawowe znaczenie ma rodzaj enzymu. Jeśli porównalibyśmy prędkości zachodzenia różnych reakcji przy wysokich stężeniach substratu, to okaże się, że różne enzymy wytworzą w tym samym czasie różną ilość produktów. Jest to tak zwana **liczba obrotów**, czyli liczba cząsteczek substratu, które jedna cząsteczka enzymu może przetworzyć w produkt w jednostce czasu. Liczba obrotów jest ściśle związana z **prędkością maksymalną** – V_{max} reakcji **(2.2.)**. V_{max} to maksymalna prędkość reakcji dla danej ilości enzymu – czyli liczba obrotów cząsteczki enzymu pomnożona przez liczbę działających cząsteczek. Wartość liczby obrotów jest różna dla różnych enzymów. Przykładowo dla anhydrazy węglanowej, w przybliżeniu przeprowadzającej w ciągu 1 sekundy 10^6 reakcji, liczba obrotów wynosi właśnie 10^6. Z kolei dla polimerazy DNA I, jednej z polimeraz odpowiedzialnych za syntezę DNA, liczba obrotów wynosi 15. Jeszcze niższa jest dla lizozymu – wynosi tylko 0,5, co oznacza, że zachodzi maksymalnie jedna reakcja na dwie sekundy! Jak widać, różnice między prędkością działania enzymów są bardzo duże. Prędkość ta jest jednak zawsze znacznie większa niż prędkość tych samych reakcji bez uczestnictwa enzymów.



2.2. Szybkość reakcji enzymatycznej dla dwóch enzymów (A i B) w zależności od stężenia substratu. W tym przypadku prędkość maksymalna jest taka sama dla obu enzymów.

? Na podstawie wykresu określ, dla którego enzymu (A czy B) szybkość reakcji rośnie szybciej przy wzroście stężenia substratu.

Optymalna liczba obrotów bywa osiągana rzadko – w sytuacji, gdy stężenie substratu jest bardzo duże i enzym jest nim w pełni wysycony. W warunkach fizjologicznych (czyli w żywych komórkach) zwykle mamy do czynienia ze stężeniami znacznie niższymi. Mniejsza jest wtedy szansa, że enzym trafi na cząsteczkę odpowiedniego substratu i ją przyłączy. Oznacza to, że część cząsteczek enzymu nie będzie związana z substratem i nie będzie mogła przeprowadzać reakcji. Zatem im niższe stężenie substratu, tym mniejsze jest wysycenie nim enzymu i – tym mniejsza szybkość reakcji. Podobnie jak w przypadku

liczby obrotów, właściwość ta zależy od rodzaju enzymu. Jedne z nich łączą się z substratem lepiej, inne – gorzej. Mówimy, że różne jest **powinowactwo** enzymu do substratu. Im wyższe powinowactwo, tym więcej cząsteczek enzymu połączy się z substratem, nawet w niższych jego stężeniach. Miarą tego powinowactwa jest tak zwana **stała Michaelisa**, oznaczana jako K_M. To stężenie substratu, przy którym reakcja enzymatyczna osiąga połowę prędkości maksymalnej. Zatem im mniejsza stała Michaelisa (czyli mniejsze stężenie, przy którym reakcja osiąga połowę prędkości maksymalnej), tym sprawniej enzym przyłącza substrat i tym większe jest powinowactwo enzymu do substratu. Zależność tę zapisujemy następującym równaniem:

$$V = \frac{V_{max}[S]}{[S] + K_M}$$

V – prędkość reakcji
V_{max} – maksymalna prędkość reakcji
K_M – stała Michaelisa
[S] – stężenie substratu

Jeśli stężenie substratu jest takie jak stała Michaelisa, to równanie przyjmuje postać:

$$V = \frac{V_{max}[S]}{[S] + [S]}, \text{ czyli } V = V_{max}\frac{1}{2}$$

Z kolei gdy stężenie jest bardzo duże, wartość stałej Michaelisa jest zaniedbywalnie mała (zwykle w zakresie od 10^{-5} do 10^{-3} mol/dm^3). W takim wypadku:

$$V = \frac{V_{max}[S]}{[S]}, \text{ czyli } V = V_{max}$$

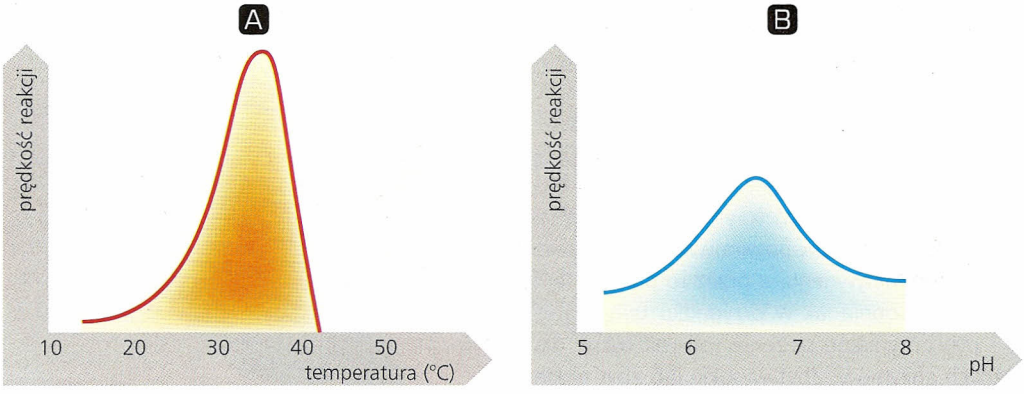
Jak wynika z wykresu **(2.2.)**, wraz ze wzrostem stężenia substratu szybkość reakcji enzymatycznych zbliża się asymptotycznie do prędkości maksymalnej (ale jej nie osiąga). Ma to kilka ważnych konsekwencji dla organizmów żywych. Przede wszystkim, przy wysokich wartościach stężenia substratów dalsze jego zwiększanie ma stosunkowo niewielki wpływ na szybkość reakcji. Z kolei przy wartościach poniżej stałej Michaelisa wzrost szybkości reakcji jest wprost proporcjonalny do stężenia substratu. Zwiększanie stężenia do wartości równej stałej Michaelisa ma więc duży wpływ na prędkość reakcji enzymatycznej. Gdy natomiast substrat osiągnie stężenie o wartości wyższej, wpływ ten jest znacznie mniejszy. Nie dziwi zatem, że wiele substratów jest w komórkach utrzymywanych w stężeniach bliskich stałej Michaelisa właściwej dla określonych enzymów!

Stała Michaelisa ma, podobnie jak liczba obrotów, różną wartość dla różnych enzymów. Dla anhydrazy węglanowej wynosi aż 8000 μM (mikromoli), czyli 8 x 10^{-3} M/dm^3. Zatem dopiero przy bardzo dużych stężeniach substratów enzym ten osiąga połowę maksymalnej prędkości reakcji. Anhydraza działa zwykle w warunkach dużego stężenia dwutlenku węgla, więc prędkość reakcji (bez wątpienia ogromna) i tak zbliżona jest do prędkości maksymalnej. Z kolei dla lizozymu stała Michaelisa wynosi tylko 6 μM, czyli 6 x 10^{-6} M/dm^3 (ponad 1000 razy mniej niż w wypadku anhydrazy!). Reakcja przeprowadzana przez lizozym jest więc stosunkowo wolna (tylko 0,5 obrotu na sekundę), ale przy bardzo niskich stężeniach substratu osiąga połowę prędkości maksymalnej.

Czynniki wpływające na szybkość reakcji enzymatycznych

Dotychczas omówiliśmy dwa czynniki wpływające na szybkość reakcji enzymatycznych. Jeden z nich to **liczba obrotów enzymu**, czyli maksymalna liczba reakcji katalizowanych przez cząsteczkę enzymu w jednostce czasu. Drugi to **stała Michaelisa**, czyli miara powinowactwa enzymu do substratu. Obie te cechy są związane ze **stężeniem substratów**. Jednak działanie enzymów zależy również od innych czynników. Gdy są one nieodpowiednie, czyli wykraczają poza optimum konkretnego enzymu, efektywność jego pracy znacznie spada.

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na szybkość reakcji, także tych niekatalizowanych, jest temperatura **(2.3.)**. Od niej w znaczący sposób zależą właściwości białek, w tym enzymów. Nie dziwi zatem fakt, że ma ona tak duży wpływ na reakcje enzymatyczne. Generalnie, wraz ze wzrostem temperatury aktywność enzymów rośnie. Jednak powyżej pewnej temperatury,



2.3. Zależność prędkości reakcji katalizowanych przez przykładowe enzymy od temperatury (A) i pH (B)

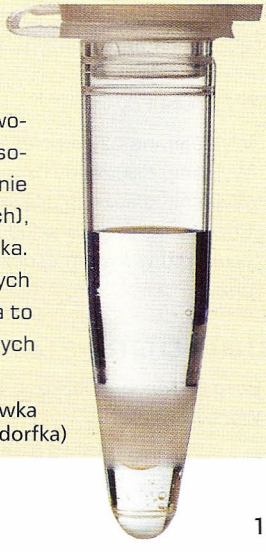
podobnie jak wszystkie białka, ulegają one nieodwracalnej **denaturacji**. U większości istot żywych optymalną aktywność enzymów obserwuje się w temperaturach zbliżonych do typowej dla tych organizmów ciepłoty ciała. Stanowi to przykład ewolucyjnej adaptacji. Przykładowo: dla enzymów produkowanych przez organizm człowieka najodpowiedniejsza jest temperatura w zakresie od 35°C do 40°C. Z kolei organizmy zmiennocieplne do osiągnięcia optymalnej wydajności enzymów muszą podnieść temperaturę ciała, dlatego też wystawiają się na działanie promieni słonecznych. Niezależnie od tego optymalna temperatura działania ich enzymów jest zwykle niższa niż dla odpowiedników tych enzymów występujących w organizmach stałocieplnych.

Bardzo ważnym czynnikiem wpływającym na aktywność enzymów jest też **odczyn środowiska**, czyli **pH** (2.3.). Wiąże się to z wpływem jonów wodorowych H^+ na ładunki elektryczne enzymu. Modyfikują one jego strukturę, ale przede wszystkim – aktywność. Zmiany te są zwykle odwracalne. Bywa jednak, że gdy pH osiąga wartości skrajne (np. pod wpływem silnych kwasów i zasad), również dochodzi do trwałego zniszczenia struktury enzymu (denaturacji).

Większość enzymów występujących w organizmie człowieka preferuje lekko kwaśne i obojętne środowisko (w zakresie pH od 6 do 8). Jednak w przypadku niektórych z nich, chociażby enzymów trawiennych, jest inaczej. Przykładem może być trawiąca białko pepsyna, najbardziej aktywna przy pH około 2 (1,5–3). Z kolei trypsyna trawiąca białko, wytwarzana przez trzustkę, preferuje pH około 8, a biorąca udział w cyklu mocznikowym arginaza – nawet około 10. Są też enzymy aktywne w szerszym zakresie pH, takie jak papaina zawarta w papai (2.4.). Wykazuje ona największą

:: Ciekawostka

Istnieją enzymy, które nie ulegają denaturacji w wysokich temperaturach (o wartości nawet powyżej 100°C). Takie wyjątkowo odporne enzymy, czasem określane jako „ekstremozymy", zaobserwowano u ekstremotermofili, czyli organizmów żyjących w bardzo wysokich temperaturach. Przyczyną dużej odporności jest występowanie w cząsteczce enzymu większej ilości silnych wiązań (np. jonowych), co utrudnia jej denaturację. Enzymy takie są przydatne dla człowieka. Przykładem jest polimeraza *Taq*, wyizolowana z występującej w gorących źródłach bakterii *Thermus aquaticus*. Optymalna dla niej temperatura to około 80°C. Odkrycie tego enzymu umożliwiło rozwój badań genetycznych i biologii molekularnej.



Mikroprobówka (tzw. eppendorfka)

aktywność w zakresie pH od 5 do 9, co powoduje, że szeroko stosuje się ją w środkach czyszczących i do zmiękczania mięsa.

Ważnym czynnikiem wpływającym na aktywność enzymów jest również stężenie soli. Pochodzące z soli jony przyłączają się do **centrum aktywnego** oraz innych części enzymu. Dołączenie jonów może zwiększyć powinowactwo substratu do centrum aktywnego, a przez to przyspieszyć reakcję. Podobnie jak w przypadku temperatury i pH, optymalne stężenie soli jest różne dla różnych enzymów. Zbyt wysokie lub zbyt niskie stężenia zmniejszają aktywność enzymu, a nawet mogą doprowadzić do jego pełnej dezaktywacji.

Na enzymy może mieć też wpływ wiele związków chemicznych, zarówno zwiększających ich aktywność (tzw. **aktywatory**), jak i ograniczających ją (tzw. **inhibitory**). Pewne ich typy są w organizmie wykorzystywane do regulacji aktywności enzymów. Szerzej omówiono to zagadnienie w następnym rozdziale.



2.4. Owoce papai to źródło jednego z najbardziej wszechstronnych enzymów proteolitycznych (rozkładających białko).

PODSUMOWANIE

- Enzymy nie mogą zmienić reakcji endoergicznej w egzoergiczną, ponieważ nie wpływają na stan równowagi reakcji. Natomiast zmniejszają jej energię aktywacji.
- Niższa energia aktywacji wpływa na szybsze osiągnięcie przez substrat stanu przejściowego, co przyspiesza całą reakcję.
- Liczba obrotów to liczba cząsteczek substratu, które jedna cząsteczka enzymu może przetworzyć w produkt w jednostce czasu i przy wysokim stężeniu substratu. Liczba ta jest różna dla różnych enzymów.
- Prędkość maksymalna reakcji to liczba obrotów enzymu pomnożona przez liczbę jego cząsteczek.
- Stała Michaelisa informuje o powinowactwie enzymu do substratu. Jest to stężenie substratu, przy którym reakcja osiąga połowę prędkości maksymalnej. Dla różnych enzymów stała ta ma różną wartość.
- Oprócz stężenia substratu duże znaczenie mają inne warunki, w jakich przebiega reakcja katalizowana przez enzym: temperatura, pH i stężenie soli.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, na czym polega mechanizm przyspieszania reakcji chemicznej przez enzym.
2. Wyjaśnij, dlaczego różne enzymy mają różne optymalne temperatury, pH i stężenia soli.
3. Wyjaśnij, dlaczego stężenia fizjologiczne substratów są często zbliżone do stałej Michaelisa.
4. Enzymy są często składnikami środków czystości (np. proszków do prania). Poszukaj takiego produktu w swoim otoczeniu. Jak myślisz, jakie właściwości powinien mieć zawarty w nim enzym?

BIBLIOGRAFIA

- Berg J. M., Tymoczko J. L., Stryer L., *Biochemia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.

3. Regulacja aktywności enzymów. Rybozymy

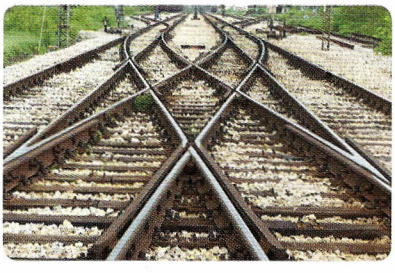
Działalność enzymów w związku z rolą, jaką odgrywają w komórce, jest ściśle kontrolowana. Zapobiega to nagromadzeniu jednych związków i niedoborowi innych. Kontrola ta odbywa się na wielu etapach: od regulacji ilości produkowanych enzymów, poprzez modyfikację wytworzonego katalizatora, aż po odwracalne i nieodwracalne blokowanie jego działania. W mechanizmie kontroli duże znaczenie mają procesy fosforylacji i defosforylacji cząsteczki enzymu.
Część procesów zachodzących w komórce jest katalizowana nie przez enzymy białkowe, lecz przez cząsteczki kwasu rybonukleinowego (RNA), tak zwane **rybozymy**.

Aktywacja nowych cząsteczek enzymów

Enzymy biorą udział właściwie we wszystkich reakcjach chemicznych zachodzących w komórce. Są też wydzielane poza komórki, by tam przeprowadzać określone procesy. Dlatego wszelkie nieprawidłowości w działaniu tych związków mają ogromne konsekwencje. Zbyt duża aktywność danego enzymu może prowadzić do nagromadzenia się produktów jego działania i, na przykład, zachwiania równowagi osmotycznej. Nadmierne wiązanie przez enzym jakiegoś substratu może z kolei utrudnić zachodzenie innych procesów, w których związek ten jest wykorzystywany. Aby temu zapobiec, komórki kontrolują działanie enzymów i regulują je w zależności od potrzeb. Niejednokrotnie reakcja na warunki środowiska musi być natychmiastowa (np. w razie dużego spadku stężenia związków wykorzystywanych przez komórkę jako źródło energii).

Konieczność uwzględnienia wielu czynników sprawia, że regulacja działania enzymów odbywa się na wielu etapach oraz w różnorodny sposób. Najbardziej podstawowym ze sposobów jest kontrola ilości enzymu w komórce. Jak wszystkie białka organizmu, enzymy są wytwarzane na podstawie informacji zawartej w DNA. Może jednak zostać zablokowany cały proces przetwarzania tej informacji na sekwencję aminokwasów w enzymie. Włączanie lub wyłączanie przetwarzania informacji z DNA wpływa bezpośrednio na liczbę produkowanych na jego podstawie cząsteczek enzymów. Gdy powstanie ich mniej, spada intensywność reakcji przeprowadzanych przez dany enzym.

Aktywność enzymu może być także regulowana na etapie tak zwanej **obróbki potranslacyjnej**, obejmującej modyfikacje nowo powstałego białka. Oznacza to, że enzymy produkowane w formie nie do końca aktywnej zaczynają wy-

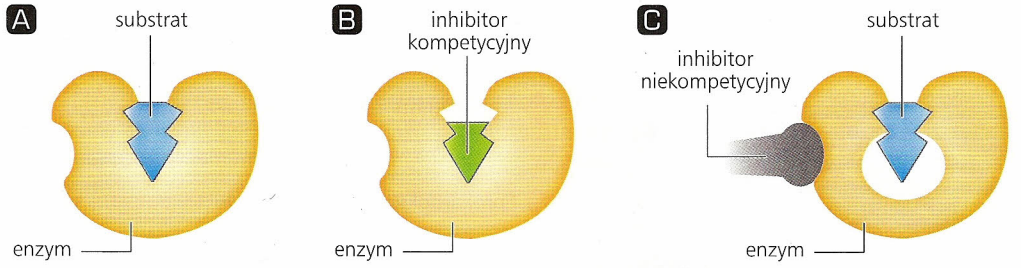


3.1. Aktywacja proenzymów trzustkowych

kazywać pełne właściwości enzymatyczne dopiero po zmodyfikowaniu. Specyficznym przypadkiem jest tworzenie **proenzymów** (inaczej nazywanych zymogenami). Są to nieaktywne formy enzymów, które dopiero po hydrolizie części wiązań peptydowych (np. odcięciu części łańcucha aminokwasów) ulegają aktywacji. Taki sposób przekształcenia w aktywny enzym jest nieodwracalny. Znaczenie proenzymów dobrze uwidacznia przykład **enzymów trawiennych**, zwłaszcza – trawiących białko. Gdyby były one aktywne od razu po wyprodukowaniu, zaczęłyby trawić białka komórki i doprowadziłyby do jej zniszczenia. W związku z tym produkowane są w formie określonych proenzymów, które ulegają aktywacji dopiero w przewodzie pokarmowym. Czynniki aktywujące enzym mogą być różne. Przykładowo: syntetyzowany w trzustce nieaktywny chymotrypsynogen pod wpływem trypsyny zmienia się w dwunastnicy w aktywną chymotrypsynę (3.1.). Podobnie trypsyna, produkowana przez trzustkę w formie trypsynogenu, ulega aktywacji w dwunastnicy pod wpływem odcięcia części aminokwasów przez enteropeptydazę. Z kolei pepsyna powstaje w komórkach błony śluzowej żołądka w formie pepsynogenu i jest aktywowana w bardzo kwaśnym środowisku żołądka. Aktywacja ta ma postać autokatalizy – pepsynogen sam dokonuje odpowiednich cięć swojego łańcucha i przekształca się w pepsynę! Rola proenzymów nie ogranicza się jednak do regulacji działania enzymów trawiennych. Jako ważny element mechanizmu krzepnięcia krwi proenzymy (protrombina i fibrynogen) są w trakcie tego procesu aktywowane do trombiny i fibryny. Nawet insulina jest początkowo produkowana jako proinsulina, chociaż do krwi wydzielana jest już w postaci odpowiednio zmodyfikowanej formy aktywnej.

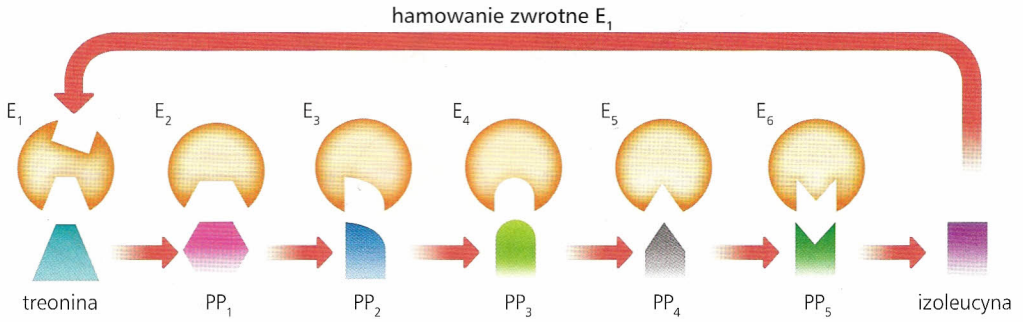
Inhibicja

Opisane wyżej mechanizmy regulacji pozwalają zmieniać ilość aktywnego enzymu, są jednak nieodwracalne. Ich ograniczeniem jest więc na przykład szybkość, z jaką zachodzą. Raz aktywowany enzym pozostaje aktywny tak długo, jak długo zachowuje prawidłową strukturę (3.2.), a – jak wiadomo – enzymy nie zużywają się podczas reakcji. Znacznie szybsza jest odwracalna modyfikacja aktywności enzymu, ponieważ pozwala zmieniać go z postaci nieaktywnej w aktywną (i na odwrót) w zależności od potrzeb. Odmianą tego mechanizmu jest **inhibicja kompetycyjna** (3.2.), podczas której aktywność enzymu jest regulowana przez niewielką cząsteczkę nazywaną **inhibitorem**. Łączy się ona czasowo z **centrum aktywnym**, które staje się chwilowo niezdolne do przyłączenia właściwego substratu. Można powiedzieć, że substrat i cząsteczka regulatorowa konkurują o dostęp do miejsca aktywnego enzymu. Jednak gdy stężenie substratu jest bardzo duże, obecność cząsteczek inhibitora nie ma większego znaczenia – konkurencja o dostęp do miejsc aktywnych ze strony substratu jest tak duża, że niemal wszystkie cząsteczki enzymu są z nim połączone. W związku z tym inhibicja kompetycyjna nie zmienia maksymalnej prędkości reakcji, a jedynie **stałą Michaelisa** – konieczne jest wyższe stężenie substratu, żeby osiągnąć połowę maksymalnej prędkości reakcji.



3.2. Porównanie normalnej reakcji enzymatycznej (A) z inhibicją kompetycyjną (B) i niekompetycyjną (C)

? Wskaż różnice pomiędzy inhibicją kompetycyjną a niekompetycyjną pod względem miejsca wiązania inhibitora i zmian struktury enzymu.



3.3. Przykład działania inhibicji na zasadzie sprzężenia zwrotnego: produkt ostatniej reakcji, izoleucyna, blokuje enzym E_1, co hamuje pierwszą reakcję w ciągu – przekształcanie treoniny.

Z kolei w trakcie **inhibicji niekompetycyjnej** (3.2.) cząsteczka inhibitora nie konkuruje z substratem o dostęp do miejsca aktywnego. Zamiast tego przyłącza się do enzymu w innym miejscu. Efektem jest zmiana właściwości enzymu, obejmująca na przykład modyfikację struktury jego centrum aktywnego. Jak wiadomo, wpływa na nią budowa całej cząsteczki enzymu. Ta zmiana blokuje albo przyłączenie substratu (centrum aktywne jest dla niego niedostępne), albo samo katalizowanie reakcji. W drugim przypadku, nawet jeśli substrat może się bez utrudnień łączyć z centrum aktywnym, nie jest przekształcany w produkt. W obu sytuacjach stężenie substratu nie ma wpływu na aktywność enzymu, który nie jest w stanie usunąć inhibitora przyłączonego w innym miejscu niż substrat. W efekcie spada **maksymalna prędkość reakcji** – część cząsteczek enzymu jest nieaktywna i nie prowadzi katalizy, więc o prędkości maksymalnej decydują tylko te, które nie są związane z inhibitorem.

Oba opisane wyżej typy inhibicji są bardzo przydatne podczas regulacji ciągów powiązanych reakcji. Powiązanie reakcji występuje w komórkach bardzo często: produkt pierwszej reakcji jest substratem następnej, a jej produkt – substratem kolejnej. Produkt końcowy takiego ciągu może być inhibitorem enzymu katalizującego pierwszą reakcję w łańcuchu przemian. Gdy zatem tego produktu jest dużo, cały łańcuch jest wyłączany – dodatkowa ilość produktu nie jest przecież konieczna, a substrat może być wykorzystywany w innych procesach. To przykład **sprzężenia zwrotnego ujemnego** (3.3.). Wykorzystanie jednego lub drugiego typu inhibicji zależy do konkretnej reakcji. Jeśli stężenie substratu ma wpływać na skuteczność działania inhibitora, wykorzystywana jest inhibicja kompetycyjna, jeśli nie powinno mieć wpływu – lepsze efekty da inhibicja niekompetycyjna.

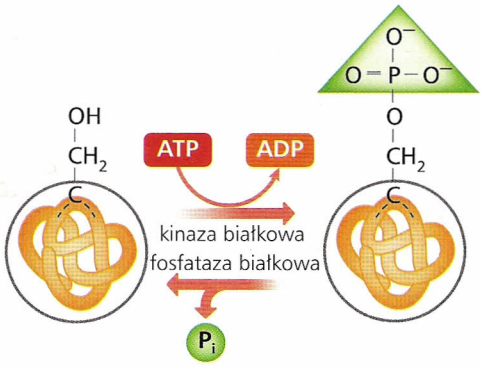
Należy pamiętać, że przyłączanie dodatkowych cząsteczek do centrum allosterycznego enzymu nie zawsze musi zmniejszać jego aktywność. Wręcz przeciwnie, niektóre cząsteczki pełnią funkcje **aktywatorów**. Po ich przyłączeniu aktywność enzymu znacznie wzrasta, a w niektórych przypadkach enzym wykazuje aktywność katalityczną wyłącznie po przyłączeniu aktywatora.

:: Ciekawostka

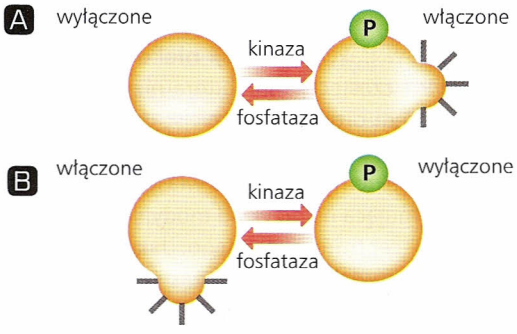
Opisane typy inhibicji to procesy odwracalne. Gdy natomiast inhibitor trwale łączy się z enzymem, mówimy o inhibicji nieodwracalnej. Proces ten (podobnie zresztą jak inhibicja odwracalna) bywa podstawą mechanizmu działania leków. Na przykład penicylina trwale wiąże się z centrum aktywnym transpeptydazy glikopeptydowej. Enzym ten jest odpowiedzialny za produkcję składników ściany komórkowej bakterii. Penicylina blokuje go, co prowadzi do śmierci bakterii. Z kolei aspiryna trwale łączy się z jednym z enzymów odpowiedzialnych za rozwój stanu zapalnego, dzięki czemu znacznie ogranicza ten proces (a w efekcie również jeden z jego objawów – podwyższoną temperaturę).

Fosforylacja i defosforylacja

Bardzo częstym sposobem regulacji aktywności enzymów jest fosforylacja i defosforylacja ich cząsteczek. Fosforylacja **(3.4.)** to dość prosty proces: do cząsteczki enzymu przyłączane są **reszty fosforanowe**, które mają ładunek ujemny. Powoduje to zmianę łącznego ładunku enzymu, a pośrednio również jego struktury (poprzez oddziaływania elektrostatyczne). Do jednej cząsteczki enzymu może się w różnych miejscach przyłączyć różna liczba reszt fosforanowych. Każda z nich zmienia jego ładunek i strukturę. Efektem końcowym jest albo **aktywacja**, albo **dezaktywacja** enzymu **(3.5.)**. Z kolei defosforylacja jest procesem odwrotnym, polegającym na usuwaniu reszt fosforanowych. Ma on efekty odwrotne do fosforylacji i specyficzne dla konkretnego enzymu. Mechanizm regulacji aktywności enzymów za pomocą fosforylacji i defosforylacji komplikuje się przez to, że procesy te również są katalizowane przez enzymy. Za fosforylację odpowiadają enzymy należące do **kinaz białkowych**, a źródłem reszt fosforanowych jest dla nich ATP (szerzej omówiony w następnym rozdziale). Defosforylację przeprowadzają natomiast **fosfatazy białkowe**. Oba typy enzymów są stale aktywne, a kierunek zmian zależy od tego, czy aktywniejsza jest kinaza, czy – fosfataza. Od ich względnej aktywności zależy aktywność enzymu podlegającego fosforylacji i defosforylacji. Jak wszystkie mechanizmy regulacji aktywności enzymów, także ten jest procesem wielopoziomowym, pozwala jednak na szybką i precyzyjną aktywację i dezaktywację enzymów. Efektem jest natychmiastowa reakcja na zmiany zachodzące w komórce i jej otoczeniu.



3.4. Fosforylacja i defosforylacja cząsteczki białka (np. enzymatycznego)



3.5. Aktywacja (A) i dezaktywacja (B) enzymu na skutek fosforylacji

Rybozymy

Omawiając katalizatory biologiczne, mówiliśmy dotychczas tylko o enzymach białkowych. Ma to swoje uzasadnienie. Białka są cząsteczkami złożonymi, a 20 tworzących je aminokwasów ma różnorodne właściwości. Efektem jest zróżnicowanie budowy, któremu nie dorównują lipidy i węglowodany. Oprócz enzymów istnieją jednak inne związki, których podstawowe elementy różnią się właściwościami chemicznymi i występują w dużych ilościach w jednej supercząsteczce. Złożona budowa takich supercząsteczek pozwala na zróżnicowanie właściwości chemicznych w zależności od udziału i kolejności poszczególnych typów podjednostek. Dlatego związki te są w stanie pełnić funkcję magazynu informacji (m.in. dotyczących budowy białek). Chodzi oczywiście o kwasy nukleinowe – DNA i RNA.

Do katalizowania reakcji chemicznych zdolny jest **kwas rybonukleinowy**, czyli **RNA**. Wynika to z większej różnorodności jego struktury. DNA występuje w postaci dwuniciowej (rzadziej – jednoniciowej). Natomiast RNA syntetyzowany jest w formie jednoniciowych cząsteczek, których komplementarne odcinki często łączą się w skomplikowane struktury. Cząsteczka fałduje się w sposób zależny od sekwencji nukleotydów, co przypomina nieco trzeciorzędową strukturę białka. Skoro skomplikowana struktura enzymów białkowych odpowiada za formowanie centrum aktywnego, podobnie może się dziać w przypad-



3.6. Przebieg reakcji katalizowanej przez rybozym

ku RNA. Związek ten składa się tylko z czterech rodzajów nukleotydów (jest ich zatem znacznie mniej niż rodzajów aminokwasów budujących białko), ale mimo to RNA może wykazywać pewne właściwości katalityczne **(3.6.)**. Niesparowane nukleotydy mogą łączyć się z substratem (np. inną nicią RNA) i odpowiednio zmieniać jego właściwości. W efekcie zachodzi określona reakcja chemiczna (np. przecięcie substratu). Cząsteczkę RNA zdolną do katalizowania reakcji chemicznych nazywamy **rybozymem**. W związku z ograniczoną liczbą podstawowych elementów rybozymy są znacznie mniej wszechstronne niż enzymy białkowe. Oznacza to, że katalizują stosunkowo niewiele reakcji. Odgrywają jednak ważną rolę w procesie tworzenia białek na bazie informacji zawartej w DNA (np. w **rybosomach**). Rybozymy odpowiadają też za obróbkę („dojrzewanie") umożliwiającą działanie innych cząsteczek RNA.

Przypuszcza się, że w początkach istnienia życia RNA był odpowiedzialny zarówno za przekazywanie informacji genetycznej, jak i za katalizowanie reakcji, ponieważ może spełniać te funkcje. Jednak w miarę doskonalenia się budowy organizmów żywych rola RNA malała. Za przekazywanie informacji odpowiedzialność przejęło DNA – bardziej stabilne, a więc mniej narażone na uszkodzenia i błędy. Natomiast katalizowanie reakcji chemicznych stało się zadaniem znacznie wszechstronniejszych i bardziej wydajnych enzymów białkowych. Rolą RNA pozostało przede wszystkim pośredniczenie między DNA i białkami oraz katalizowanie związanych z tym reakcji. Wciąż jest to jednak bardzo ważne zadanie.

PODSUMOWANIE

- Pierwszym poziomem regulacji aktywności enzymów jest kontrola ich ilości poprzez wpływanie na syntezę białek enzymatycznych na matrycy DNA.
- Nowo wytworzone enzymy mogą być nieaktywne (jak np. proenzymy).
- Inhibicja odwracalna pozwala na aktywację lub inaktywację enzymu w zależności od potrzeb.
- Inhibicja kompetycyjna polega na łączeniu inhibitora do centrum aktywnego enzymu. Duże stężenie substratu łagodzi wpływ inhibitora.
- Inhibitory niekompetycyjne łączą się z enzymem poza centrum aktywnym. Stężenie substratu nie ma wpływu na działanie inhibitora.
- Fosforylacja polega na przyłączaniu reszt fosforanowych do cząsteczki enzymu. Defosforylacja to proces odwrotny.
- Rybozymy to cząsteczki RNA, które wykazują właściwości katalityczne.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego wpływ stężenia substratu jest różny przy inhibicji kompetycyjnej i niekompetycyjnej.
2. Omów te właściwości RNA, które pozwalają rybozymom katalizować reakcje chemiczne.
3. Sporządź tabelę, w której przyporządkujesz enzymom trawiennym wymienionym w tekście odpowiednie proenzymy i czynniki aktywujące.
4. Wyjaśnij, w jaki sposób fosforylacja i defosforylacja zmieniają właściwości enzymów.

BIBLIOGRAFIA

- Chachulska A. M., *Rybozymy – katalityczne czasteczki* RNA, „Postępy Biochemii" 1992, nr 38, s. 64–74.
- Murray R., Granner D., Rodwell V., *Biochemia Harpera*, PZWL, Warszawa 2010.

4. Przenośniki energii

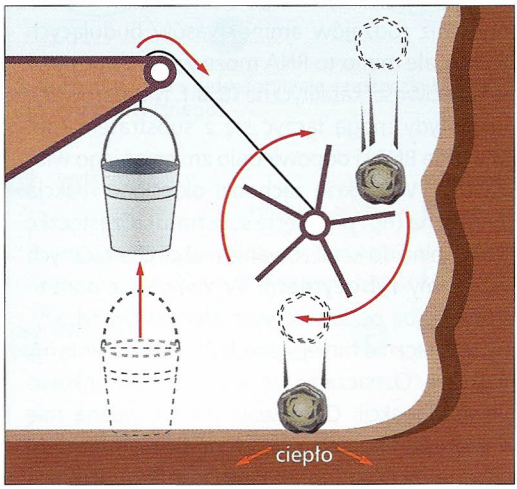
Enzymy pozwalają na przyspieszanie reakcji metabolicznych, jednak nie umożliwiają zachodzenia reakcji niekorzystnych energetycznie (endoergicznych). Do ich przeprowadzenia konieczne jest sprzężenie dwóch reakcji lub dostarczenie energii z zewnątrz. Wykorzystywany do tego ostatniego celu nośnik energii, **ATP**, jest w związku z tym jedną z najważniejszych cząsteczek występujących w komórce. Ma on wiele cech, które pozwalają mu bardzo sprawnie spełniać jego funkcję.

Źródła energii reakcji

Reakcje katalizowane przez enzymy przebiegają bardzo szybko. Cząsteczki te mogą jednak tylko przyspieszać reakcje, nie zmieniają natomiast ich kierunku. Zgodnie z tą regułą obecność enzymów umożliwiałaby zajście jedynie reakcji egzoergicznych, w których wydzielana jest energia. Przebiegłyby one spontanicznie (choć wolniej) także bez udziału katalizatora. Znacznie ograniczyłoby to różnorodność przeprowadzanych procesów. Niemożliwa byłaby między innymi synteza większości związków organicznych, ponieważ ich wytworzenie (jako bardziej skomplikowanych) wymaga dostarczenia energii.

Do ominięcia tego ograniczenia najczęściej służą wspomniane już reakcje sprzężone **(4.1.)**. Zasada ich działania jest prosta: podczas **reakcji egzoergicznej** wydziela się energia, która zamiast ulec rozproszeniu (np. w postaci ciepła), jest natychmiast wiązana w zachodzącej obok **reakcji endoergicznej**. Niektóre z tego typu sprzężeń omówiono w kolejnych rozdziałach. Wszystkie one mają jedną poważną wadę – reakcje muszą zachodzić równocześnie i blisko siebie, inaczej energia nie zostanie przekazana. To tak, jakby energii elektrycznej nie dało się przesyłać i magazynować, a wszystkie czynności wymagające zużycia prądu trzeba było wykonywać w elektrowni (tylko tam działałyby pralki, lodówki, komputery, żarówki itp.). Byłaby to sytuacja bardzo niewygodna.

Każda komórka ma własną „minielektrownię". U organizmów eukariotycznych jest nią **mitochondrium**. Powstaje w nim energia chemiczna, która może zostać wykorzystana w różnych reakcjach. To rozwiązanie ma dużo zalet, jednak nie zapewnia dostaw energii wystarczających na zasilenie wszystkich procesów. Wiele z nich przebiega bowiem w pewnym oddaleniu od mitochondriów



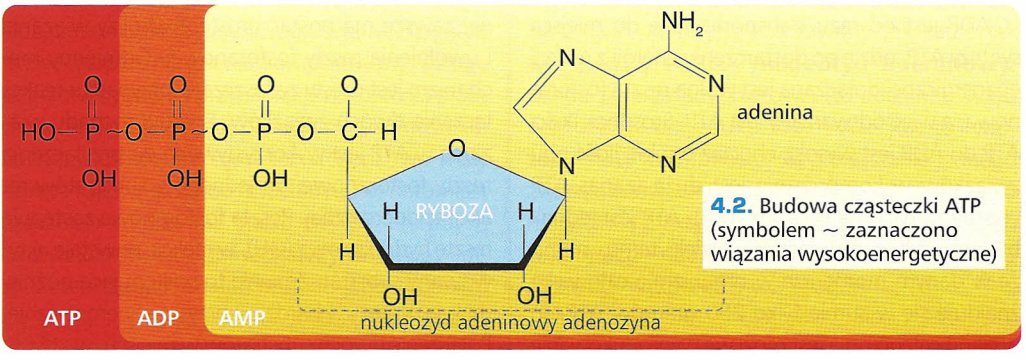
4.1. Zasada działania reakcji sprzężonych: energia spadających kamieni (reakcja egzoergiczna) jest wykorzystywana do podnoszenia wiadra z wodą (reakcja endoergiczna).

(np. synteza DNA w jądrze komórkowym). Komórki rozwiązały problem przesyłania energii między organellami: wytwarzają niewielkie związki, będące funkcjonalnymi odpowiednikami baterii. Ich wykorzystanie pozwala dostarczać energię potrzebną podczas procesów zachodzących w różnych częściach komórki. Związki pełniące tę funkcję określamy jako uniwersalne aktywowane **nośniki energii**. Ich produkcja odbywa się na zasadzie reakcji sprzężonych: energia wydzielana podczas reakcji egzoergicznej nie zostaje związana od razu w docelowej reakcji, lecz wykorzystana jest do wytworzenia nośnika energii.

Związek chemiczny pełniący funkcję nośnika energii musi mieć takie same cechy, jak idealna bateria. Przede wszystkim powinien być niewielki, dzięki czemu – produkowany w ogromnych ilościach – nie będzie zużywać zbyt wiele materiału (związków chemicznych). Powinien również, mimo niewielkiej objętości, magazynować dużo energii łatwej do równoczesnego

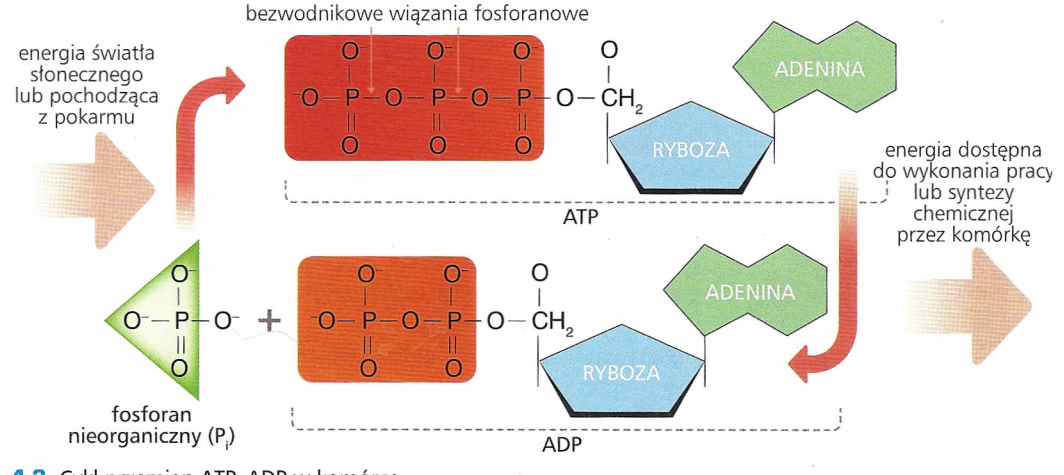
uwolnienia. Reakcje bowiem zachodzą bardzo szybko i dawka energii musi być dostarczona w odpowiednim momencie, a nie uwalniana stopniowo, przez dłuższy czas. Nośnik energii powinien też być łatwy w transporcie i stabilny. Jego podstawowym zadaniem jest właśnie przenoszenie energii, musi on więc bez problemu przemieszczać się w komórce. Co ważne, nie może ulegać przypadkowemu rozpadowi, spowodowałoby to bowiem przedwczesne uwolnienie energii i jej utratę. Cechą takiego związku musi też być łatwość jego produkcji – najlepiej powiązanie jej z „liniami produkcyjnymi" już istniejącymi w komórce.

ATP



4.2. Budowa cząsteczki ATP (symbolem ~ zaznaczono wiązania wysokoenergetyczne)

Funkcję uniwersalnego nośnika energii w komórkach pełni związek, o którym już kilkakrotnie wspominano. To **adenozynotrifosforan**, czyli **ATP** (4.2.). Jego cząsteczka składa się z trzech podstawowych elementów. Największym z nich jest **zasada azotowa** z grupy puryn – **adenina** (ta sama, która występuje w RNA i DNA). Adenina połączona jest z cząsteczką **rybozy** i razem tworzą nukleozyd adeninowy. Takie połączenie występuje również w RNA. Z nukleozydem adeninowym za pośrednictwem rybozy łączone są **reszty fosforanowe**. Układ tych reszt jest najważniejszym elementem ATP, jeśli chodzi o przenoszenie energii. Są one połączone między sobą liniowo (a nie każda z osobna z rybozą), tworzą w ten sposób bezwodnikowe wiązania między resztami fosforanowymi. To typowe wiązania kowalencyjne, ale ich utworzenie zmienia właściwości cząsteczki (np. ładunki). Powoduje to, że wiążą duże ilości energii (30,5 kJ lub 7,3 kcal na mol wiązań). Tak przygotowany ATP jest gotów do transportu i dostarczenia energii potrzebnej w trakcie procesów zachodzących w komórce (4.3.). Energia z ATP uwalniana jest podczas hydrolizy wiązań między



4.3. Cykl przemian ATP–ADP w komórce

resztami fosforanowymi. Odbywa się to, podobnie jak wcześniej synteza ATP, na zasadzie reakcji sprzężonych. Tym razem jednak to ATP oddaje energię, która umożliwia przeprowadzenie reakcji endoergicznej. Efektem hydrolizy ATP jest wolna reszta fosforanowa i cząsteczka zawierająca dwie związane reszty fosforanowe. Cząsteczka ta to **adenozynodifosforan**, czyli **ADP**.

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi + energia$$

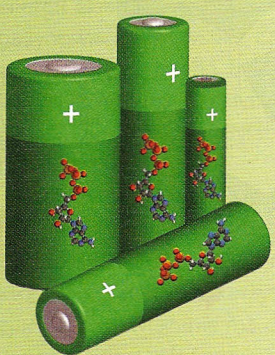
ADP jest od razu transportowany do miejsca syntezy ATP, gdzie po dostarczeniu energii z reakcji egzoergicznej dołączana jest wolna reszta fosforanowa, a więc odtwarzany jest ATP. Stosunek ilości ATP do ADP jest wysoki, chociaż ogólna ilość obu związków w komórce nie jest duża (zapas ATP wystarcza tylko na kilka sekund!). ATP jest jednak bardzo szybko odtwarzany. Dzięki temu, mimo że w danym momencie w organizmie człowieka znajduje się w sumie tylko 250 gramów ATP, to w ciągu całego dnia jest możliwe wyprodukowanie i zużycie ponad 45 kilogramów tego związku!

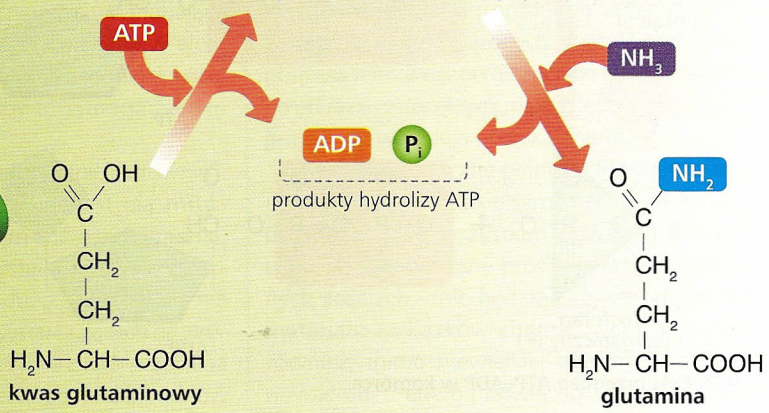
Warto pamiętać, że ATP zawiera dwa wiązania wysokoenergetyczne. Zwykle hydrolizie podlega najbardziej zewnętrzne, w wyniku czego powstaje ADP. Jednak czasem energia jest uzyskiwana z rozpadu wiązania pomiędzy pierwszą i drugą resztą fosforanową. Powstaje wtedy **adenozynomonofosforan**, czyli **AMP**. Zawiera on tylko jedną resztę fosforanową, nie występują w nim w związku z tym wiązania wysokoenergetyczne. Jednak po dostarczeniu odpowiedniej ilości energii i uzupełnieniu obu reszt fosforanowych z AMP może zostać odtworzony ATP.

Przekazanie energii z wiązań między resztami fosforanowymi do sprzężonej reakcji endoergicznej nie zawsze ma postać prostej hydrolizy wiązania i uwolnienia reszty fosforanowej. Odmienny mechanizm jest częsty zwłaszcza w przypadku reakcji łączenia dwóch związków. Energia rozpadu wiązania w ATP jest wykorzystywana do przyłączenia reszty fosforanowej do jednego z substratów reakcji endoergicznej. Reszta fosforanowa zastępuje resztę hydroksylową (OH), w efekcie powstaje aktywowany substrat. Zmienia to następującą później reakcję syntezy w bardziej korzystną energetycznie. Połączenie dwóch substratów w miejscu, w którym znajduje się już reszta fosforanowa, jest bardzo łatwe. Równocześnie z łączeniem się substratów uwalniana jest reszta fosforanowa. Przykładem takiej reakcji jest synteza glutaminy z innego aminokwasu – kwasu glutaminowego **(4.4.)** i amoniaku.

4.4. Przykład tworzenia produktu poprzez wcześniejsze aktywowanie substratu za pomocą ATP

? Wyjaśnij, dlaczego nie jest przeprowadzana reakcja bezpośredniego przyłączania amoniaku do kwasu glutaminowego (bez wcześniejszego przyłączenia reszty fosforanowej).

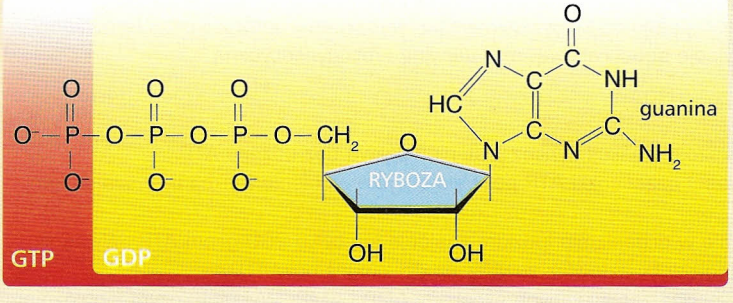




W jakim stopniu ATP wykazuje wspomniane właściwości uniwersalnej baterii? Z wiązaniem i uwalnianiem energii związek ten radzi sobie bardzo dobrze, o czym świadczą omówione reakcje. ATP jest też bardzo stabilny, mimo że przenosi dużą ilość energii – jego samoistny rozpad (nawet w obecności wysoce reaktywnego tlenu) to kwestia wielu godzin lub nawet dni. Dopiero pod wpływem odpowiedniego **enzymu** energia zawarta w ATP zostaje szybko uwolniona. Jej wykorzystanie może zatem być precyzyjnie regulowane. Transport ATP w cytoplazmie jest nieskomplikowany i polega na prostej dyfuzji (w przypadku przenoszenia przez błony zwykle występują specjalne przenośniki). Adenozynotrifosforan jest też stosunkowo mały – nieco tylko większy od disacharydów, natomiast znacznie mniejszy niż białka (w tym enzymy!), kwasy nukleinowe, polisacharydy, a nawet lipidy. Zatem zużycie materiałów do jego produkcji nie jest na tyle duże, by utrudnić wytwarzanie go w znacznych ilościach. Zawiera przy tym tylko pięć pierwiastków (węgiel, wodór, tlen, azot i fosfor), które należą do najczęściej występujących w komórce, a jego powstawanie jest powiązane z wieloma procesami w niej zachodzącymi. Najlepiej widać ten związek na przykładzie **RNA**. Jednym z jego czterech podstawowych elementów składowych (monomerów) jest w rzeczywistości ATP po odłączeniu dwóch reszt fosforanowych, czyli AMP. AMP jest zbudowany tak samo jak występujący w RNA **nukleotyd adeninowy**: składa się z zasady azotowej (tu adenina), cukru pentozy (w przypadku RNA i ATP jest to ryboza) i reszty fosforanowej. Wykorzystanie jednego związku w dwóch tak odmiennych rolach pozwala na większą efektywność procesów zachodzących w komórce – nadmiar związku z jednego procesu może być wykorzystany w drugim.

:: Ciekawostka

ATP nie jest jedynym trifosforanem nukleotydu, który może pełnić funkcję nośnika energii. Pozostałe pochodne nukleotydów RNA, czyli guanozynotrifosforan (GTP), urydynotrifosforan (UTP) oraz cytydynotrifosforan (CTP), również mogą dostarczać energię – głównie podczas reakcji biosyntez. Największą rolę odgrywa GTP wykorzystywany w biosyntezie białka. Wszystkie trifosforany nukleotydowe są równoważne energetycznie, co oznacza, że hydroliza wiązań między ich resztami fosforanowymi dostarcza tyle samo energii. Jednak tylko ATP jest uniwersalnie wykorzystywany w metabolizmie komórki.



guanozynotrifosforan

Synteza ATP

Przyłączanie reszt fosforanowych, w wyniku którego powstaje ATP, to **fosforylacja** (tak jak proces wykorzystywany podczas regulacji pracy enzymów). Synteza ATP może zachodzić w różny sposób w zależności od tego, jaki proces – sprzężony z tą syntezą – jest dla niej źródłem energii. Wyróżniamy w związku z tym trzy główne typy fosforylacji.

Fosforylacja substratowa to ewolucyjnie najstarszy i najmniej wydajny rodzaj fosforylacji. Zachodzi podczas **glikolizy** i **cyklu Krebsa**. Jako źródło reszt fosforanowych wykorzystuje bogaty w energię związek organiczny (substrat). Początkowo reszta fosforanowa połączona jest wiązaniem wysokoenergetycznym z węglem

związku organicznego. Następnie, w wyniku przekształceń substratu, zostaje ona przeniesiona na ADP i połączona z nim wiązaniem wysokoenergetycznym. Efektem jest powstanie ATP. Schematyczny zapis tego typu fosforylacji przedstawia się następująco:

substrat wysokoenergetyczny + ADP + Pi → produkt niskoenergetyczny + ATP

Fosforylacja oksydacyjna jest głównym sposobem uzyskiwania energii ze związków organicznych. W wyniku ich rozkładu elektrony są przez łańcuch przekaźników przenoszone na tlen. Proces ten określany jest jako utlenianie w **łańcuchu oddechowym** i zachodzi w mitochondriach. Uwalniana w tym procesie energia pozwala na syntezę dużej ilości ATP. W związku z wykorzystaniem tlenu jako akceptora elektronów fosforylacja ta może zachodzić tylko w **warunkach tlenowych**. Schematycznie można to zapisać:

ADP + Pi + zredukowane przenośniki wodoru i elektronów + O_2 → ATP + utlenione przenośniki wodoru i elektronów + H_2O

Fosforylacja fotosyntetyczna wykorzystuje do syntezy ATP energię elektronów wzbudzonych przez światło. Jest ona podstawowym elementem pierwszego etapu fotosyntezy (szczegółowe informacje na temat tego typu fosforylacji zawiera rozdział 18.). Reakcję tę można schematycznie zapisać w następujący sposób:

ADP + Pi + energia świetlna → ATP

Zarówno fosforylacja oksydacyjna, jak i fotosyntetyczna zachodzą zgodnie z założeniami tak zwanej **hipotezy chemiosmotycznej Mitchella**. Szerzej ten temat omówiono w rozdziale 10.

PODSUMOWANIE

- Reakcje sprzężone pozwalają na przekazanie energii z reakcji egzoergicznej do powiązanej z nią reakcji endoergicznej.
- Przekazanie energii z reakcji egzoergicznej do reakcji endoergicznej przebiegającej w innej części komórki jest możliwe dzięki adenozynotrifosforanowi, czyli ATP.
- ATP zawiera wiązania między resztami fosforanowymi, których hydroliza powoduje wydzielenie się dużej ilości energii.
- Po odłączeniu jednej reszty fosforanowej od ATP powstaje adenozynodifosforan, czyli ADP, oraz wolna reszta fosforanowa. Po dostarczeniu energii jest z nich odtwarzany ATP.
- ATP powstaje w procesie fosforylacji. Może on przebiegać w różny sposób w zależności od źródła energii wykorzystywanego do tworzenia wiązań wysokoenergetycznych. Wyróżniamy w związku z tym fosforylację substratową, oksydacyjną i fotosyntetyczną.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego większość reakcji syntez jest niemożliwa bez udziału ATP.
2. Wyjaśnij, jakie właściwości cząsteczki ATP pozwalają jej na pełnienie funkcji uniwersalnego przenośnika energii.
3. W konkretnym momencie w organizmie ludzkim znajduje się tylko 250 gram ATP. Wyjaśnij, jak to możliwe, że w ciągu doby człowiek zużywa aż 45 kilogramów ATP.
4. Podaj nazwy związków zwykle zapisywanych skrótami ADP i AMP. Wyjaśnij, czym się różnią.
5. Wymień źródła energii w trzech głównych typach fosforylacji.

BIBLIOGRAFIA

- Khakh B. S., Burnstock G., *Podwójne życie ATP*, „Świat Nauki" 2010, nr 1.

5. Inne uniwersalne przenośniki

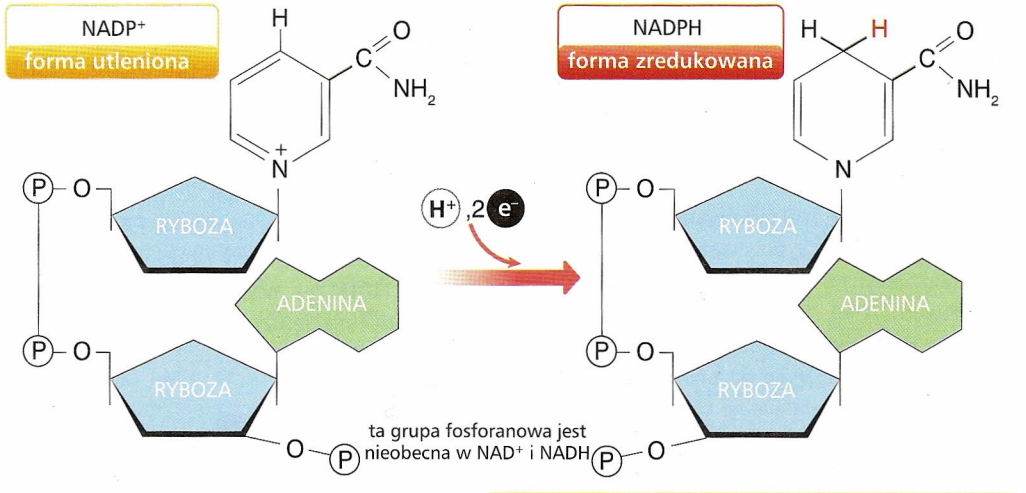
Metabolizm komórki wymaga sprawnego przenoszenia nie tylko energii, lecz także drobnych cząsteczek, jonów i elektronów. W związku z tym działanie ATP jest uzupełniane przez inne aktywowane przenośniki, z których najważniejszymi są **przenośniki wodoru** i **elektronów** oraz **koenzym A**. Mimo że pełnią one różne funkcje, mają wspólny element budowy. Jest nim zasada azotowa – **adenina**.

Przenośniki wodoru

Oprócz energii z ATP, dla przeprowadzenia reakcji w komórkach konieczne są też elementy budulcowe związków organicznych. Jednym z pierwiastków występujących w organizmach w największych ilościach jest wodór. Jest on też stale dołączany od cząsteczek w procesach redukcji i odłączany od nich podczas utleniania. Razem z wodorem przenoszone są elektrony. Mogą one być następnie wykorzystane w produkcji energii podczas fosforylacji oksydacyjnej. Jak widać, sprawny transport wodoru w komórce ma bardzo duże znaczenie. Nie jest w związku z tym dziwne, że występują w niej specjalnie przenośniki, które umożliwiają dostarczenie atomów wodoru i elektronów dokładnie tam, gdzie jest to konieczne.

Przenośniki wodoru to grupa trzech podobnie zbudowanych cząsteczek: NAD^+, $NADP^+$ oraz FAD. Najważniejsze z nich są dwie pierwsze. **NAD^+**, czyli dinukleotyd nikotynoamidoadeninowy, jest – jak nazwa wskazuje – zbudowany z dwóch **nukleotydów**. Jeden z nich zawiera poznaną już **adeninę**, drugi – pochodną jednej z witamin z grupy B. Zwykle w organizmie NAD^+ występuje w formie utlenionej, która ma ładunek dodatni. Jednak podczas niektórych reakcji na jego cząsteczkę mogą zostać przeniesione dwa **elektrony**. Powoduje to zmianę ładunku cząsteczki na ujemny, co umożliwia natychmiastowe przyjęcie **jonu wodorowego** H^+, czyli pojedynczego **protonu** (tym jest w rzeczywistości atom wodoru pozbawiony elektronu). Efektem jest powstanie formy zredukowanej, czyli **NADH**. We wzorze sumarycznym tego związku nie uwzględnia się ładunku, ponieważ podczas redukcji (przyłączenia dwóch elektronów i jonu wodorowego) został on zobojętniony. Dzieje się tak, gdyż elektrony zobojętniają zarówno dodatni jon wodoru, jak i samą cząsteczkę NAD^+.

Pomimo braku ładunku cząsteczka NADH niesie dużo energii. Reakcja odłączenia od niej wodoru i elektronów (utlenianie) jest silnie **egzoergiczna**. Nie zachodzi ona jednak spontanicznie, lecz dopiero pod wpływem odpowiedniego enzymu. NADH jest zatem, tak jak ATP, bardzo dobrym

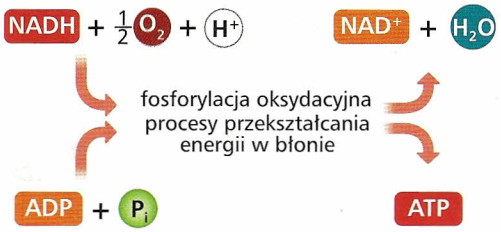


5.1. Budowa $NADP^+$ i NADPH

? Wskaż różnice w budowie między formą zredukowaną i utlenioną tego dinukleotydu.

przenośnikiem. Podobnie działa drugi związek przenoszący wodór – fosforan dinukleotydu nikotynoamidoadeninowego, czyli **NADP⁺** (5.1.). Od NAD⁺ różni się on tylko dołączoną **resztą fosforanową** (stąd litera P w nazwie). W stanie podstawowym jest naładowany dodatnio, czyli tak samo jak NAD⁺. Po przyłączeniu dwóch elektronów i jonu wodorowego przechodzi w formę zredukowaną – **NADPH**.

W jakim celu w komórce występują dwie cząsteczki o takich samych właściwościach? Pomimo podobnej budowy NADH i NADPH są wykorzystywane w zupełnie różnych reakcjach. Reszta fosforanowa w NADPH nie wpływa na właściwości związane z przenoszeniem elektronów i wodoru, oddziałuje natomiast na ogólną strukturę cząsteczki. Jej obecność lub brak decyduje zatem o tym, z jakimi enzymami wiążą się cząsteczki przenośnika (czyli do jakich **centrów aktywnych** pasują). To z kolei określa, w jakich reakcjach przenośnik może brać udział. Dzięki temu oba typy cząsteczek działają w sposób całkowicie niezależny. Wodór i elektrony z NADH są wykorzystywane w procesach dostarczających energii, przede wszystkim w **oddychaniu komórkowym** (5.2.). Natomiast NADPH bierze udział w biosyntezie różnych związków, przenosząc wodór i elektrony na cząsteczkę substratu i umożliwiając jej redukcję. NADPH odgrywa ogromną rolę podczas fotosyntezy, jednak występuje również u organizmów heterotroficznych. Rozdzielenie funkcji obu przenośników pozwala na dokładną regulację ilości elektronów i wodoru dostępnych zarówno podczas produkcji energii, jak i syntezy związków organicznych. Wodór i elektrony z NADPH są

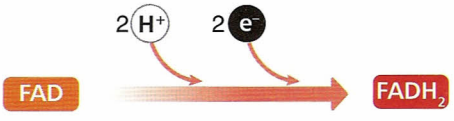


5.2. Schemat wykorzystania NADH do syntezy ATP podczas oddychania komórkowego

zarezerwowane dla biosyntezy i nie mogą być (nawet przypadkowo) wykorzystane jako źródło energii. Zatem nawet przy niedoborze energii w komórce NADPH będzie dostępny i niezbędne biosyntezy będą mogły zachodzić.

W drodze ewolucji osiągnięta została równowaga między dwiema cechami przenośników: uniwersalnością i możliwościami regulacji ich działania. Z jednej więc strony oznacza to, że przenośniki wodoru i elektronów są, podobnie jak ATP, wspólne dla wszystkich organizmów: bakterii, grzybów, roślin i zwierząt (w tym człowieka). Z drugiej strony, liczba ich typów jest bardzo mała – dokładnie taka, jakiej potrzeba do precyzyjnej regulacji wykorzystania tych związków w różnych procesach. To przykład oszczędności i optymalizacji metabolizmu.

Mogłoby się wydawać, że tej optymalizacji przeczy występowanie **FAD**, czyli dinukleotydu flawinoadeninowego. To trzeci przenośnik elektronów i wodoru, który nieco różni się od wcześniej opisanych. Podobnie jak one, zbudowany jest z dwóch nukleotydów, z których jednym jest adenina, a drugim pochodna witaminy z grupy B. Jednak w przeciwieństwie do NAD⁺ i NADP⁺, forma utleniona FAD nie ma ładunku, tak jak forma zredukowana! Ta ostatnia powstaje przez przyłączenie dwóch elektronów e^- i dwóch protonów H^+ (a nie jednego, jak w NADH i NADPH). Ładunki się równoważą i powstaje **$FADH_2$** (5.3.). Przenosi on elektrony i jony wodoru w reakcjach, w których **NAD⁺** nie może być redukowany. FAD pełni zatem funkcję uzupełniającą w niektórych procesach metabolicznych, jest też koenzymem wielu enzymów.

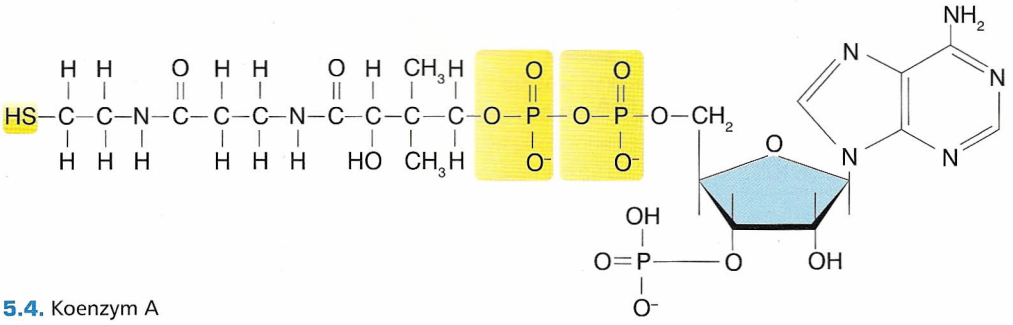


5.3. Reakcja redukcji FAD do $FADH_2$

:: Ciekawostka

Prawie wszystkie aktywowane przenośniki zawierają elementy powstałe z cząsteczek witamin (jedynym wyjątkiem jest najprościej zbudowany ATP). Są to wyłącznie witaminy z grupy B, będące najważniejszą grupą koenzymów. Duże znaczenie witamin w organizmie polega po części właśnie na tym, że są składnikami aktywowanych przenośników. Niedobór witamin może spowodować, że przenośników będzie zbyt mało dla podtrzymania prawidłowego metabolizmu komórki.

Koenzym A

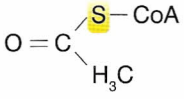


5.4. Koenzym A

Opisane dotychczas przenośniki pozwalają na przekazywanie potrzebnej podczas reakcji energii (**ATP**) oraz elektronów i wodoru (NADH, NADPH, $FADH_2$). Tlen, zwykle łatwo dostępny i wysoce reaktywny, nie wymaga dodatkowych przekaźników. Do pełnego obrazu przebiegu większości reakcji biochemicznych w komórce brakuje jeszcze jednego pierwiastka, będącego najważniejszym elementem budowy związków organicznych – **węgla**.

Odpowiedzialny za jego przenoszenie **koenzym A** (w skrócie **CoA**) to dość duża cząsteczka, której ważnym elementem jest atom siarki **(5.4.)**. W strukturze koenzymu A występuje **nukleotyd adeninowy.** Jest on jak widać uniwersalnym składnikiem aktywowanych przenośników. Wynika to z faktu, że w początkach życia prawdopodobnie umożliwiał wiązanie przenośników do **rybozymów** – odpowiadały one za katalizowanie reakcji, zanim tę funkcję przejęły enzymy.

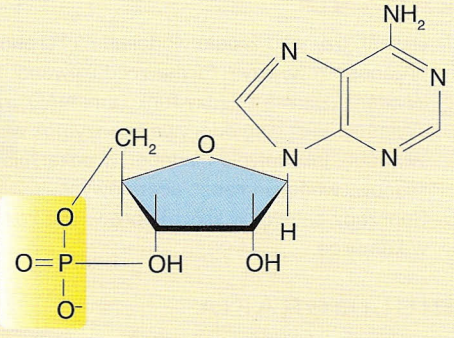
Funkcją koenzymu A jest transport zbudowanych z kilku atomów węgla cząsteczek kwasów karboksylowych (tzw. **grup acylowych**). Najczęściej przenoszone są dwuwęglowe grupy będące pochodnymi cząsteczki kwasu octowego, czyli **reszty acetylowe**. Każda taka reszta oprócz dwóch atomów węgla zawiera jeden atom tlenu i trzy atomy wodoru. Koenzym A z dołączoną resztą acetylową to acetylokoenzym A, zapisywany w skrócie jako **acetylo-CoA (5.5.)**. To stabilny związek, dlatego – podobnie jak w przypadku innych aktywowanych przenośników – jego rozpad wymaga obecności enzymów. Za połączenie reszty acetylowej z koenzymem A odpowiedzialny jest obecny w nim atom **siarki (5.6.)**. Wiązanie to ma bardzo dużą energię. Jego rozłączenie i prze-



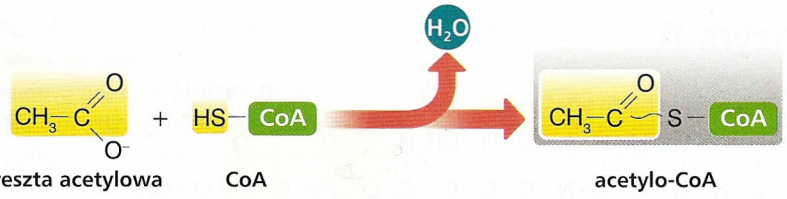
5.5. Acetylo-CoA

:: Ciekawostka

Nukleotyd adeninowy jest nie tylko składnikiem RNA i aktywowanych przenośników. Pośredniczy również w regulacji wielu procesów zachodzących w komórce. Przyłączenie cząsteczki sygnałowej (np. hormonu takiego jak adrenalina) do receptora w błonie komórkowej powoduje tworzenie cyklicznego AMP, czyli cAMP. Związek ten jest aktywatorem niektórych enzymów, co bezpośrednio wpływa na przebieg określonych reakcji (przykładem może być rozkład glikogenu w mięśniach pod wpływem adrenaliny).



Cząsteczka cAMP



5.6. Powstawanie acetylokonezymu A

niesienie reszty acetylowej na inną cząsteczkę (podobnie jak przeniesienie reszty fosforanowej z ATP) jest reakcją silnie **egzoergiczną**. Ułatwia to transport dwuwęglowych fragmentów, co odgrywa dużą rolę zarówno podczas biosyntez (gdy fragmenty te są przenoszone na związki organiczne), jak i podczas produkcji energii (gdy acetylo-CoA transportuje fragmenty z miejsca, w którym powstają, do miejsca, w którym są wykorzystywane).

Jak widać, w przeciwieństwie do NADH i NADPH, koenzym A jest wykorzystywany zarówno podczas produkcji energii, jak i syntezy związków organicznych. Rozdzielenie funkcji acetylo-CoA na dwa związki nie było konieczne. Aby z jego reszty acetylowej została uwolniona energia, musi zajść wiele etapów pośrednich (elektrony z NADH mogą być wykorzystywane znacznie prościej). Istnieje więc dużo okazji do regulowania wykorzystania acetylo-CoA w różnych procesach. Organizmy mogły zatem zredukować liczbę przenośników węgla do niezbędnego minimum, czyli w tym wypadku – do jednego.

PODSUMOWANIE

- Na przekazywanie wodoru i elektronów między reakcjami pozwalają odpowiednie przenośniki.
- Wszystkie trzy przekaźniki wodoru występują w komórce w dwóch formach: utlenionej (NAD^+, $NADP^+$ i FAD) oraz zredukowanej (NADH, NADPH i $FADH_2$).
- Przyłączenie do cząsteczki NAD^+ lub $NADP^+$ dwóch elektronów i jonu wodorowego H^+ powoduje ich przejście w formę zredukowaną. Po oddaniu przyłączonych elektronów i wodoru z powrotem powstaje forma utleniona.
- NADH jest wykorzystywany do produkcji energii, natomiast NADPH – do syntezy związków organicznych (redukcja substratów). $FADH_2$ pełni natomiast uzupełniającą funkcję w niektórych reakcjach.
- Koenzym A przyłącza dwuwęglowe reszty acetylowe, w wyniku czego tworzy acetylo-CoA.
- Acetylo-CoA może przekazywać reszty acetylowe do syntezy związków organicznych lub do produkcji energii.

ZADANIA

1. Określ, czy jako źródło wodoru i elektronów wykorzystywana jest utleniona forma ich przenośników, czy – forma zredukowana. Odpowiedź uzasadnij.
2. Wyjaśnij różnicę między funkcjami NAD^+ i $NADP^+$ w komórce.
3. Wyjaśnij, jaką rolę odgrywa koenzym A w uzyskiwaniu energii ze związków organicznych.
4. Wyjaśnij, jak wpłynie niedobór w pokarmie witamin z grupy B na syntezę przenośników elektronów, wodoru i reszt acetylowych.
5. Sporządź tabelę, w której porównasz różne uniwersalne przekaźniki pod względem ich funkcji w komórce.

BIBLIOGRAFIA

- Horgan J., *Świat według RNA*, „Świat Nauki" 1996, nr 3.

6. Szlaki metaboliczne. Katabolizm i anabolizm

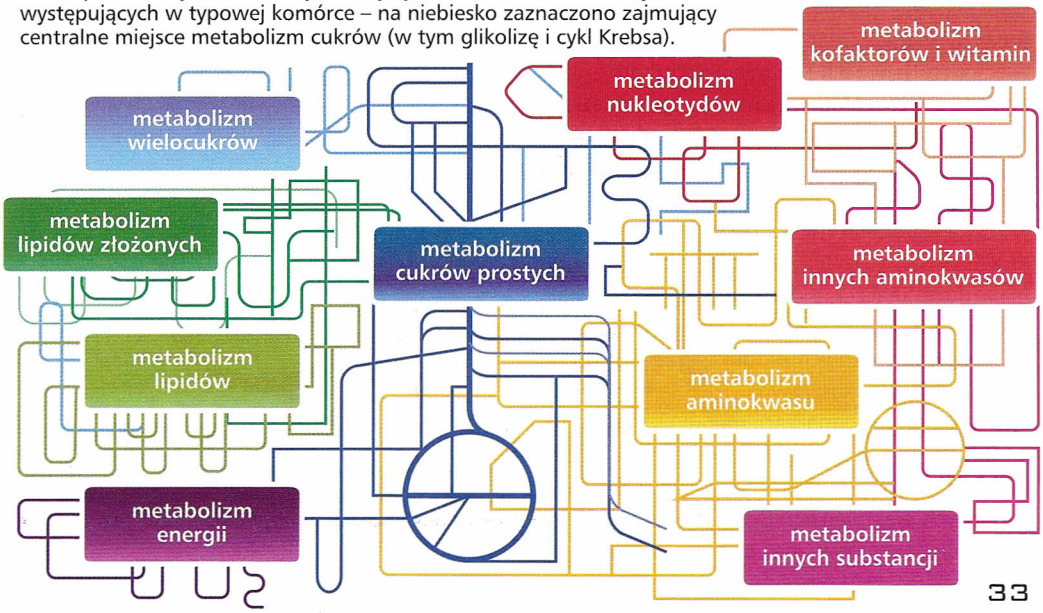
Reakcje zachodzące w komórkach są elementami **ciągów przemian metabolicznych**, prowadzących od pierwotnego substratu do ostatecznego produktu. W ich wyniku z prostych elementów powstają złożone związki organiczne albo też skomplikowane związki są rozkładane do znacznie prostszych i uzyskiwana jest energia. Niektóre ciągi reakcji są właściwe tylko dla pewnych grup organizmów, ale większość jest wspólna dla wszystkich istot żywych.

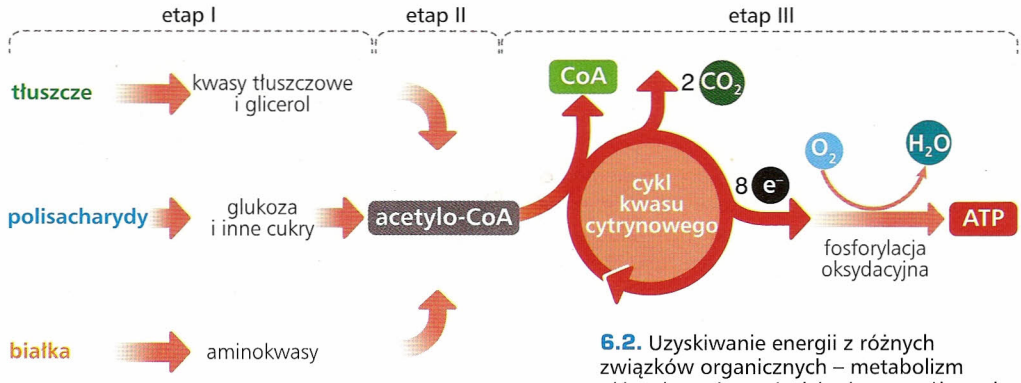
Szlaki metaboliczne

W poprzednich rozdziałach omówione zostały podstawowe elementy odpowiedzialne za reakcje zachodzące w komórkach. Są to **enzymy** (przyspieszające przebieg reakcji) i różnego typu **przenośniki** (umożliwiające zajście reakcji endoergicznych). Działanie przenośników analizowane było dotychczas głównie w odniesieniu do pojedynczych reakcji. Jednak metabolizm komórki to szereg powiązanych ze sobą, wieloetapowych procesów. Reguluje je wiele mechanizmów (np. inhibicja aktywności enzymów przez sprzężenia zwrotne).

Komplikacja ta jest wynikiem złożoności budowy związków organicznych. Nawet stereoizomery danego związku mogą mieć różne właściwości, dlatego ważne jest, by ostateczny produkt syntezy dokładnie odpowiadał potrzebom komórki. Nieodpowiednia jego budowa mogłaby mieć katastrofalne skutki – wiele chorób jest wynikiem braku odpowiednich związków lub gromadzenia się wadliwie zbudowanych. Precyzyjną syntezę związków organicznych warunkują enzymy, jednak ma to swoją cenę. Przeprowadzają one zwykle tylko jedną reakcję, polegającą na stosunkowo niewielkich zmianach. Pełna synteza (bądź rozkład) związku organicznego odbywa się zatem podczas szeregu reakcji powiązanych ze sobą. Produkt pierwszej z nich jest substratem drugiej, jej produkt – substratem trzeciej i tak dalej. Tych reakcji w jednym procesie mogą być dziesiątki, a każdą katalizuje inny enzym. Można to porównać do taśmy produkcyjnej (np. w fabryce samochodów). Każde stanowisko przy taśmie odpowiada za montaż konkretnej części samochodu. Powstający produkt przesuwa się wzdłuż taśmy i podlega kolejnym przemianom. Dana maszyna lub człowiek wykonują tylko jedną czynność, nie montują całego samochodu od początku do końca. W taki sam sposób działają w komórce enzymy.

6.1. Uproszczony schemat najważniejszych szlaków metabolicznych występujących w typowej komórce – na niebiesko zaznaczono zajmujący centralne miejsce metabolizm cukrów (w tym glikolizę i cykl Krebsa).



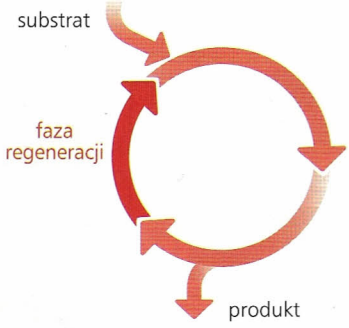


6.2. Uzyskiwanie energii z różnych związków organicznych – metabolizm różnych typów związków jest wspólny od momentu przyłączenia dwuwęglowych fragmentów do koenzymu A.

? Określ, jak na produkcję energii w komórce wpłynie znaczne zmniejszenie ilości koenzymu A.

„Taśmę produkcyjną" komórki, czyli ciąg powiązanych reakcji od pierwotnego substratu do docelowego produktu (ze wszystkimi etapami pośrednimi), określamy jako **szlak metaboliczny**. W każdej komórce jest wiele takich szlaków **(6.1.)**, a przykładami mogą być glikoliza oraz synteza kwasów tłuszczowych. W szlakach metabolicznych powstają wszystkie cząsteczki potrzebne do życia (z wyjątkiem dostarczanych w pokarmie) oraz energia. Związki występujące w komórce nie zawsze są produkowane w osobnych szlakach (jako **półprodukty** mogą być np. wykorzystane w szlaku prowadzącym do innego produktu końcowego). Szlaki często się też rozgałęziają. Wówczas kilka różnych wstępnych przemian prowadzi do uzyskania określonego półproduktu, z którego powstaje jeden produkt końcowy. Tak zorganizowane jest na przykład oddychanie komórkowe, czyli uzyskiwanie energii ze związków organicznych. Białka, tłuszcze i węglowodany mają odmienną budowę, więc początkowo ich przemiany są odrębne. Jednak po podziale zasadniczych części tych związków na identyczne dwuwęglowe fragmenty ich dalszy los jest taki sam **(6.2.)**. Występuje też sytuacja odwrotna – jeden półprodukt jest przekształcany w różne produkty. Tak zachodzi biosynteza wielu związków. Oba typy szlaków rozgałęzionych mają duże znaczenie dla komórki. Umożliwiają ograniczenie liczby „stanowisk linii produkcyjnej", czyli enzymów, których produkcja (ze względu na ich wielkość) jest kosztowna. To kolejny przykład oszczędności i optymalizacji metabolizmu.

Nie zawsze produkt wytworzony w szlaku metabolicznym jest wykorzystywany całkowicie w dalszych przemianach. Bywa tak, gdy mniejsza cząsteczka substratu zostaje przyłączona do dużego związku organicznego (będącego „stanowiskiem pracy" dla enzymów). Po wielu przemianach powstaje ostateczny produkt – jego część zawiera atomy pochodzące z substratu, a reszta to wynik przekształcenia związku, do którego substrat się przyłączał. Gdyby całość produktu została wykorzystana, czyli „wyprowadzona" ze szlaku metabolicznego, bardzo szybko zabrakłoby związku, do którego przyłączany jest substrat. Aby szlak mógł dalej działać, część cząsteczek produktu musi zostać wykorzystana do odtworzenia związku przyłączającego substrat (zachodzi tzw. **faza regeneracji**). Odtworzony związek może przyłączać kolejne cząsteczki substratu. Dzięki temu szlak, którego większość produktów nigdy nie opuszcza, dalej działa. Działanie to ma charakter cykliczny. Ten typ szlaku, stosunkowo często występujący w komórce, określamy jako **cykl przemian metabolicznych (6.3.)**. Przykładami mogą być między innymi jedne z najważniejszych etapów oddychania (cykl Krebsa) i fotosyntezy (cykl Calvina).

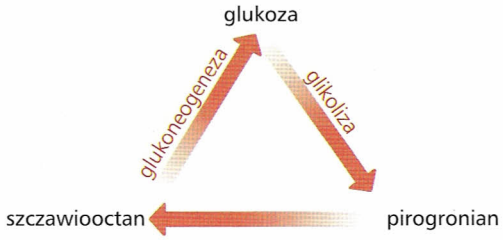


6.3. Schemat typowego cyklu przemian metabolicznych: część produktów jest wykorzystywana, reszta bierze udział w fazie regeneracji.

Anabolizm i katabolizm

Istnienie **szlaków metabolicznych** usprawnia metabolizm komórki, pozwala go też znacznie precyzyjniej regulować. Ma to duże znaczenie, ponieważ złożoność i różnorodność reakcji zachodzących w komórkach jest ogromna. Nawet stosunkowo prosty organizm, jakim jest pałeczka okrężnicy (*Escherichia coli*), przeprowadza ich ponad tysiąc. Reakcje mogą zasadniczo zachodzić w dwóch kierunkach. Gdy złożone związki są rozkładane na mniejsze elementy, a przy tym wydziela się energia, reakcje określamy jako **kataboliczne**. W procesie odwrotnym drobne cząsteczki są łączone w większe i bardziej złożone, co wymaga dostarczenia energii. Ten typ reakcji określamy jako **anaboliczne**. Ogół reakcji katabolicznych, czyli prowadzących do degradacji substancji, składa się na **katabolizm** komórki. Z kolei reakcje anaboliczne, czyli wszystkie syntezy bardziej złożonych substancji, to **anabolizm**. Wyodrębnienie tych dwóch typów reakcji to najbardziej podstawowy podział całego metabolizmu komórki.

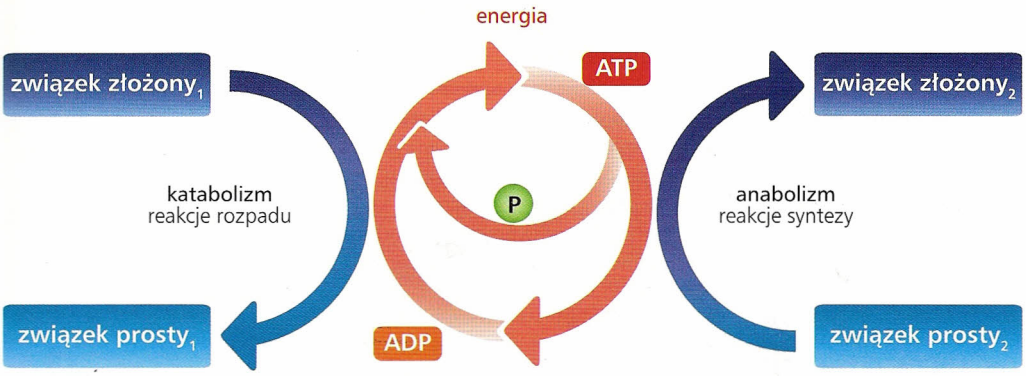
Trzeba pamiętać, że katabolizm i anabolizm są równie ważne **(6.4.)**. Przeprowadzanie reakcji anabolicznych (czyli synteza związków) zwykle nie jest możliwe bez energii uzyskanej w wyniku procesów katabolicznych. Jedyną alternatywą jest dla niej energia słoneczna, do której bezpośredniego wykorzystania zwierzęta nie są zdolne. Nawet rośliny nie wszędzie i nie zawsze mogą prowadzić fotosyntezę. W takiej sytuacji rozkładają powstałe podczas niej związki, przeprowadzając procesy kataboliczne. Z kolei bez anabolizmu niemożliwe jest wytworzenie całego aparatu odpowiedzialnego za metabolizm komórki, w tym za reakcje katabolicz-



6.5. Substraty i produkty glikolizy i glukoneogenezy

ne. Dzięki procesom anabolicznym powstają też wszystkie struktury komórkowe oraz substancje zapasowe wykorzystywane jako źródło energii. Najlepszym tego przykładem jest fotosynteza, w trakcie której wytwarzane są związki uczestniczące w procesach katabolicznych przeprowadzanych zarówno przez rośliny, jak i zwierzęta.

Pomimo że **anabolizm** i **katabolizm** często obejmują procesy przeciwstawne, nie są swoim prostym odwróceniem. Przykładem są kataboliczny szlak rozkładu glukozy (glikoliza) oraz anaboliczny szlak jej syntezy (glukoneogeneza). Substrat pierwszego szlaku jest identyczny jak produkt drugiego, ale reakcje zachodzące podczas glikolizy i glukoneogenezy oraz biorące w nich udział **enzymy**, a także produkty pośrednie, są różne **(6.5.)**. Rozdzielenie obu szlaków pozwala na sprawniejszą ich regulację, ale przede wszystkim gwarantuje efektywność przeprowadzanych procesów. Gdyby bowiem enzym był w stanie prowadzić reakcję w obie strony, mógłby zamieniać świeżo wytworzony produkt z powrotem w substrat. Zatem częściowo niszczyłby efekty własnej pracy.



6.4. Zależność między anabolizmem i katabolizmem

? Wyjaśnij, jaką rolę odgrywa ATP w powiązaniu przedstawionym na ilustracji.

Procesy kataboliczne i anaboliczne zwykle pozostają w równowadze, co jest jednym z warunków **homeostazy** (omówionej w rozdziałach 23. i 24.). Jeśli któryś typ procesów dominuje, dochodzi do zmian w budowie i funkcjonowaniu organizmu. Czasem jest to element normalnych procesów rozwojowych. W trakcie intensywnego wzrostu młodych organizmów zdecydowanie przeważa anabolizm. Podobnie jest podczas gromadzenia przez rośliny i zwierzęta zapasów (np. na zimę). Z kolei wykorzystanie tych zapasów czy procesy związane ze starzeniem się cechuje przewaga katabolizmu. Brak równowagi obu procesów może też być związany z **procesami chorobowymi**.

Warto jeszcze raz podkreślić, że podstawy metabolizmu u wszystkich organizmów są takie same. Ich procesy wewnętrzne przeprowadzane są w ten sam (lub przynajmniej bardzo podobny) sposób: wykorzystywane są te same cząsteczki budulcowe i aktywowane przenośniki, obecne są – często niemal identyczne – enzymy. Na poziomie szlaków metabolicznych podobieństwa również są ogromne. Wszystkie organizmy miały wspólnych przodków i składają się z tych samych substancji, dlatego procesy syntezy tych substancji przebiegają w identyczny sposób. Z tych samych związków chemicznych jest też uzyskiwana energia. W efekcie u różnych organizmów występuje wiele tych samych szlaków metabolicznych, zarówno anabolicznych, jak i katabolicznych.

Dla wszystkich istot żywych wspólny jest też najbardziej podstawowy proces kataboliczny, czyli **oddychanie komórkowe**. Najczęściej ma ono postać oddychania tlenowego, złożonego z glikolizy, cyklu Krebsa i utleniania w łańcuchu oddechowym. Mimo drobnych różnic zasadniczy przebieg tych procesów jest taki sam u wszystkich organizmów.

:: Ciekawostka

Równowaga między katabolizmem i anabolizmem nie oznacza, że procesy te są mało intensywne. W zdrowym organizmie zachodzi ciągły rozkład i odbudowa cząsteczek, między innymi w celu zapewnienia ich prawidłowego funkcjonowania. Szacuje się, że w ciągu roku może zostać wymienionych aż 98% atomów budujących komórki człowieka, mimo że większość komórek nie ulega wymianie.

PODSUMOWANIE

- Ciąg reakcji prowadzący od pierwotnego substratu do ostatecznego produktu to szlak metaboliczny.
- Szlak metaboliczny, w którym ostatnia reakcja powoduje odtworzenie (regenerację) jednego z wyjściowych reagentów, nazywamy cyklem przemian metabolicznych.
- Reakcje, w których dochodzi do rozpadu złożonych związków i wydzielenia energii, to reakcje kataboliczne.
- Reakcje, w których dochodzi do syntezy bardziej złożonych związków z prostszych substancji i do wiązania energii, to reakcje anaboliczne.
- Większość szlaków metabolicznych jest wspólna dla wszystkich organizmów. Jednym z najważniejszych tego przykładów jest oddychanie komórkowe.

ZADANIA

1. Sporządź tabelę, w której przyporządkujesz znane ci procesy zachodzące w komórce do jednego z dwóch typów przemian: anabolizmu lub katabolizmu.
2. Wyjaśnij, w jaki sposób brak lub zmniejszona aktywność jednego z enzymów uczestniczących w szlaku metabolicznym wpłynie na działanie całego szlaku.
3. Euglena zielona należy do miksotrofów, czyli organizmów, które mogą odżywiać się autotroficznie lub heterotroficznie w zależności od warunków środowiska. W ciemności jej chloroplasty bledną, dlatego nawet po ponownym uzyskaniu dostępu do światła nie od razu jest ona zdolna do fotosyntezy. Na podstawie informacji zawartych w tym rozdziale spróbuj wyjaśnić, jakie zmiany zachodzą w jej metabolizmie.

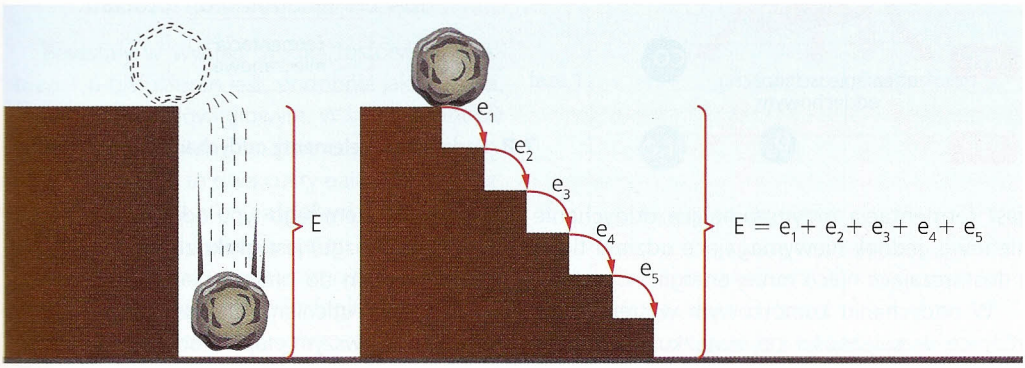
W INTERNECIE

- http://ebiolog.pl/ser-1.html

7. Oddychanie komórkowe. Glikoliza

Zapewnienie odpowiedniej ilości **energii** dla podtrzymania wszystkich procesów życiowych to konieczność, przed którą stoi każda żywa komórka. Organizmy autotroficzne korzystają na ogół z energii słonecznej, ale przy niedoborze światła, podobnie jak heterotrofy, uzyskują energię z rozkładu związków organicznych (przede wszystkim cukrów prostych). To wieloetapowy proces, którego pierwsza faza jest wspólna dla wszystkich organizmów.

Oddychanie komórkowe

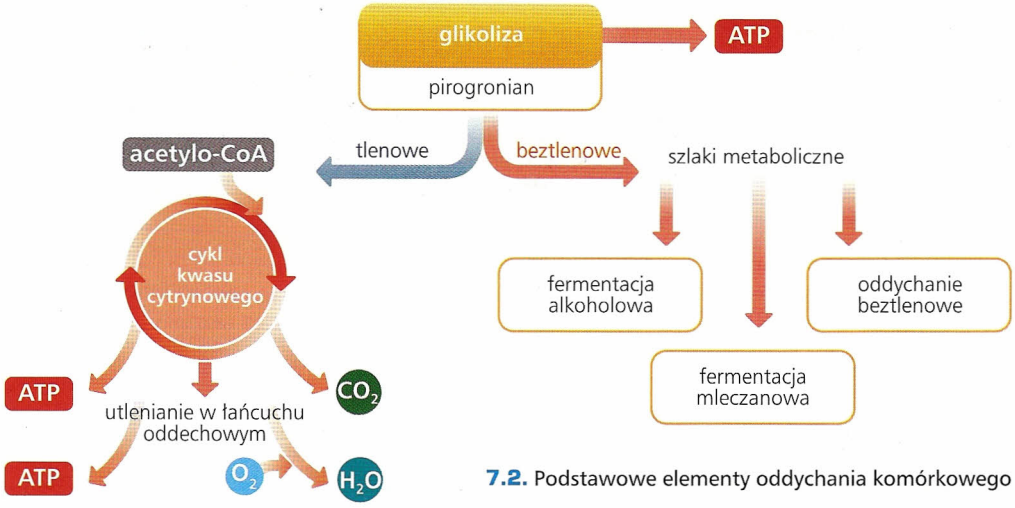


7.1. Porównanie jednorazowego i stopniowego wydzielania energii – mniejsze porcje energii są łatwiejsze do związania w ATP, w efekcie większa jej część może zostać wykorzystana.

Oddychanie komórkowe to proces uzyskiwania energii w formie ATP z utleniania substancji organicznych. W trakcie tego procesu energia uwalniana jest stopniowo, a nie naraz, co pozwala uniknąć rozproszenia większej jej części w postaci ciepła **(7.1.)**. Gdyby energia uległa rozproszeniu w tej formie, mogłoby dojść do uszkodzenia komórki przez zbyt wysoką temperaturę, ale przede wszystkim mniejsza byłaby ilość syntetyzowanego ATP.

Ponieważ produkcja energii użytecznej dla całego metabolizmu ma ogromne znaczenie, oddychanie komórkowe występuje u wszystkich organizmów żywych. Dotyczy to również autotrofów, dla których jest ono sposobem odzyskania energii związanej wcześniej podczas fotosyntezy. Duża różnorodność środowisk życia i sposobów odżywiania powoduje, że organizmy wykorzystują różne formy oddychania komórkowego. Najczęściej ma ono postać **oddychania tlenowego (7.2.)**, na które składa się **glikoliza**, **cykl Krebsa** i **utlenianie w łańcuchu oddechowym**. Mimo drobnych różnic zasadniczy przebieg tego procesu jest taki sam u wszystkich organizmów tlenowych. Stosunkowo niewiele ATP powstaje podczas niego bezpośrednio. Główną metodą produkcji ATP jest bowiem zredukowanie **przenośników elektronów** i **wodoru** (takich jak NAD^+ i FAD), a następnie wykorzystanie energii związanych przez nie elektronów do syntezy ATP. Zredukowane przekaźniki są tworzone podczas glikolizy i cyklu Krebsa, natomiast wykorzystywane podczas utleniania w łańcuchu oddechowym.

Dość częste jest również **oddychanie beztlenowe**, w którym występuje tylko pierwszy etap oddychania komórkowego (glikoliza), uzupełniony o jedną lub kilka dodatkowych reakcji. Taką „zmodyfikowaną" glikolizę nazywamy **fermentacją**. Dostarcza ona znacznie mniej energii niż oddychanie tlenowe. Fermentację przeprowadzają nie tylko organizmy beztlenowe, takie jak określone bakterie czy grzyby (np. drożdże). Wykorzystują ją też organizmy tlenowe, gdy z różnych przyczyn ilość tlenu w komórkach jest niewystarczająca (taka sytuacja występuje np. w korzeniach roślin czy intensywnie pracujących mięśniach człowieka). Pewne bakterie podczas **utleniania** w łańcuchu oddechowym zamiast tlenu wykorzystują inne związki (np. azotany lub siarczany). Efektem



7.2. Podstawowe elementy oddychania komórkowego

jest fermentacja przypominająca oddychanie tlenowe, jednak niewymagające udziału tlenu i dostarczające nieco mniej energii.

W oddychaniu komórkowym występują też różnice w zależności od związku, z którego uzyskiwana jest energia. Najbardziej podstawowym substratem tego typu oddychania (np. dla ludzkiego mózgu) jest **glukoza**. Jej metabolizm posłuży zatem do omówienia całego procesu. W przypadku utleniania glukozy i innych cukrów prostych pierwszym etapem oddychania komórkowego zawsze jest **glikoliza**.

Ogólna charakterystyka glikolizy

Glikoliza występuje u wszystkich organizmów – tak heterotroficznych, jak autotroficznych – i, mimo pewnych różnic, ma na ogół taki sam przebieg. Jest też jednym z najbardziej uniwersalnych i prawdopodobnie jednym z najstarszych szlaków metabolicznych, który mógł wykształcić się na długo przed pojawieniem się tlenu w atmosferze. Świadczy o tym niezależność glikolizy od dostępu do tlenu – za jej pośrednictwem energia jest uzyskiwana nawet w warunkach całkowicie beztlenowych. Oprócz tej niewątpliwej zalety proces ten ma jedną istotną wadę: dostarcza stosunkowo małą ilość energii. Bez obecności tlenu większość organizmów nie jest w stanie rozłożyć związków będących produktami glikolizy do prostszej postaci i odzyskać zgromadzonych w nich znacznych zasobów energetycznych. Dlatego glikoliza jest głównym źródłem energii przede wszystkim dla organizmów heterotroficznych, występujących w środowiskach o ograniczonym dostępie do tlenu. Dla organizmów oddychających tlenowo proces ten jest tylko wstępem do dalszych, bardziej złożonych reakcji, w których uwalniana jest znacznie większa ilość energii.

U organizmów eukariotycznych glikoliza jest jedynym etapem oddychania komórkowego, który zachodzi w **cytoplazmie komórki**. Wszystkie kolejne, korzystniejsze energetycznie procesy zachodzą w mitochondriach. Fakt, że do przeprowadzenia glikolizy nie są potrzebne specjalne organelle, również świadczy o tym, że pod względem ewolucyjnym jest to bardzo stary proces. Jak już wspomniano, podstawowym substratem glikolizy jest glukoza. Polisacharydy, takie jak skrobia czy glikogen, przed wykorzystaniem ich jako źródła energii muszą zostać rozłożone do glukozy. Początkiem utleniania kwasów tłuszczowych i białek są natomiast inne przemiany metaboliczne, opisane w rozdziałach 11. i 12.

Przebieg glikolizy

Glikoliza rozpoczyna się od aktywacji glukozy (**7.3.**). Odbywa się to poprzez **fosforylację** cząsteczki glukozy, czyli przyłączenie do niej jonu fosforanowego pochodzącego z ATP. Efektem jest powstanie glukozo-6-fosforanu i ADP. Pierwszy etap glikolizy wymaga więc dostarczenia energii! To kolejny powód niskiej efektywności energe-

tycznej tego szlaku metabolicznego. Dodatkowo glukozo-6-fosforan jest w reakcji izomeryzacji przekształcany we fruktozo-6-fosforan, a ten jest po raz kolejny fosforylowany. Wymaga to zużycia kolejnej cząsteczki ATP. Zatem w pierwszej fazie glikolizy zostały wykorzystane dwie cząsteczki **ATP**, a nie wyprodukowano ani jednej.

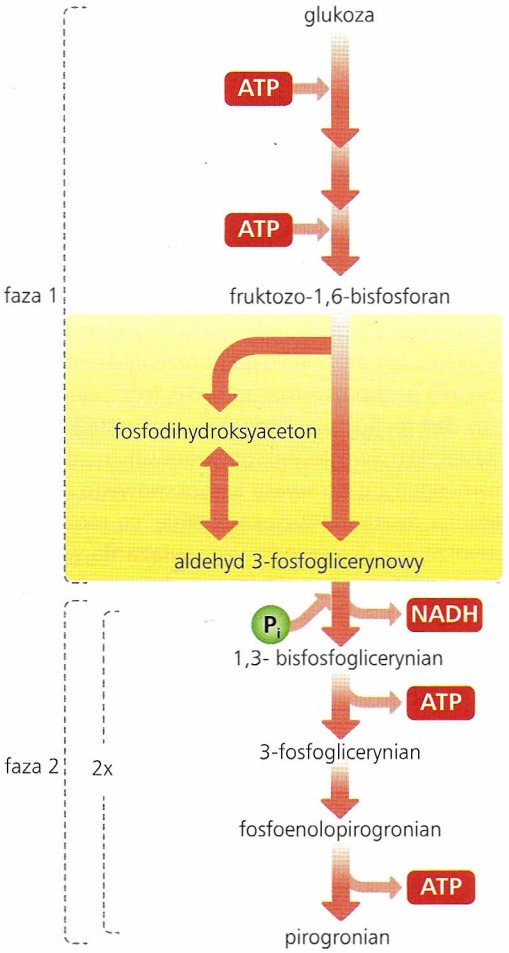
Sumarycznie można to przedstawić następująco:

glukoza + 2 ATP →
fruktozo-1,6-bisfosforan + 2 ADP

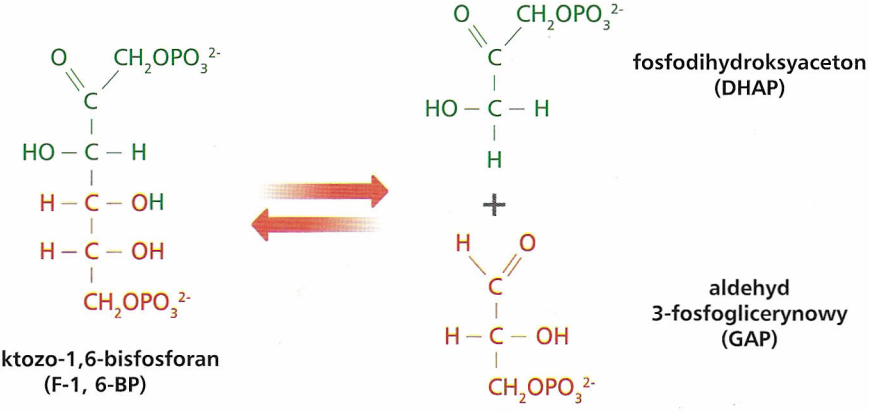
Powstały w wyniku drugiej fosforylacji fruktozo-1,6-bisfosforan jest, podobnie jak glukoza, związkiem sześciowęglowym. W kolejnym etapie jest on rozszczepiany na dwie cząsteczki trójwęglowe **(7.4.)**. Są to dwa cukry należące do trioz: fosfodihydroksyaceton i **aldehyd 3-fosfoglicerynowy**. Fosfodihydroksyaceton jest następnie izomeryzowany, w wyniku czego powstanie druga cząsteczka aldehydu 3-fosfoglicerynowego.

Reakcja rozszczepienia glukozy na dwie cząsteczki trioz ma duże konsekwencje dla dalszych etapów glikolizy i oddychania komórkowego. Jest też bardzo ważna dla zrozumienia bilansu energetycznego całego procesu. Obliczenie go nie sprawiało trudności, dopóki równał się on sumie wszystkich reakcji z udziałem jednej cząsteczki glukozy. Od momentu jej podziału przemiany, którym podlega każda z dwóch cząsteczek trioz, są takie same. Wygodniej jest więc obliczać zyski i straty energetyczne na przykładzie jednej z nich. Trzeba jednak pamiętać, że aby poznać bilans przypadający na jedną cząsteczkę glukozy, należy wynik każdej reakcji mnożyć dwukrotnie.

? Wyjaśnij, dlaczego druga faza glikolizy dotyczy dwóch cząsteczek (a nie jednej, jak pierwsza faza).



7.3. Przebieg glikolizy



7.4. Reakcja rozszczepienia fruktozo-1,6-fosforanu na dwie cząsteczki trójwęglowe

W kolejnym etapie glikolizy aldehyd 3-fosfoglicerynowy jest utleniany do kwasu 3-fosfoglicerynowego. Dwa atomy wodoru i dwa elektrony odłączone od aldehydu są wykorzystywane do **redukcji** cząsteczki NAD^+. Reakcja ta polega na przyłączeniu dwóch elektronów i tylko jednego atomu wodoru, w wyniku czego powstaje **NADH**. Nadmiarowy atom wodoru, produkt uboczny tej reakcji, zostaje uwolniony. Jest to bardzo często spotykana sytuacja.

Równocześnie z odłączaniem elektronów i jonów wodorowych od aldehydu 3-fosfoglicerynowego, do powstającego kwasu 3-fosfoglicerynowego przyłączana jest **reszta fosforanowa**. Reszta ta, w odróżnieniu od poprzednich fosforylacji, nie pochodzi z rozpadu ATP, lecz z cytoplazmy. Jest to możliwe dzięki zmianom w strukturze cząsteczki trójwęglowej, spowodowanym utlenieniem aldehydu do kwasu karboksylowego. Przyłączona reszta ma wysoką energię, co możliwia utworzenie całkowicie nowego **wiązania wysokoenergetycznego**. Efektem tych przemian jest powstanie 1,3-bisfosfoglicerynianu.

aldehyd 3-fosfoglicerynowy + Pi + NAD^+ → 1,3-bisfosfoglicerynian + NADH + H^+

Reszta ta bardzo krótko jest związana z łańcuchem węglowym. W następnym etapie glikolizy zostaje przeniesiona na cząsteczkę ADP, w efekcie czego powstają **ATP** oraz 3-fosfoglicerynian.

1,3-bisfosfoglicerynian → 3-fosfoglicerynian + ATP

Taki typ fosforylacji nazywamy **fosforylacją substratową**. Nazwa świadczy o pochodzeniu energii wiązania w ATP z wysokoenergetycznego substratu reakcji. Powstawanie 3-fosfoglicerynianu z 1,3-bisfosfoglicerynianu to pierwsza reakcja glikolizy, w której uzyskiwana jest energia. Mimo że z jednej cząsteczki 1,3-bisfosfoglicerynianu uzyskuje się tylko jedną cząsteczkę ATP, wydatek energetyczny konieczny na początku glikolizy zostaje zrównoważony. Wynika to z faktu, że cząsteczkę ATP uzyskuje się z każdej z dwóch cząsteczek triozy powstałej z rozpadu glukozy. Oznacza to, że na całą cząsteczkę glukozy przypada zysk dwóch cząsteczek **ATP**, a więc dokładnie tyle, ile zostało zużytych na początku. To samo odnosi się do przenośnika wodoru i elektronów: na każdą cząsteczkę glukozy dwie cząsteczki **NAD^+** ulegają redukcji do **NADH**.

Kolejne reakcje powodują pewne zmiany w budowie cząsteczki oraz odłączenie od niej cząsteczki wody. Efektem jest powstanie fosfoenolopirogronianu. Jak wskazuje nazwa, zawiera on związaną resztę fosforanową.

3-fosfoglicerynian → fosfoenolopirogronian + H_2O

Reszta fosforanowa jest następnie przenoszona na ADP, zachodzi zatem kolejna **fosforylacja substratowa**. W efekcie powstaje cząsteczka **ATP**

:: Ciekawostka

Substratem glikolizy (oprócz najczęściej występującej w tej roli glukozy) mogą być także inne cukry proste. Podlegają one nieco innym przemianom. Szczegółowy przebieg tego procesu zależy między innymi od organu, w którym on zachodzi. Na przykład fruktoza jest metabolizowana inaczej w tkance tłuszczowej, a inaczej – w wątrobie (gdzie jest włączana do glikolizy na etapie tworzenia cukrów trójwęglowych i dopiero dalsze jej przemiany przebiegają identycznie jak przemiany glukozy).



Miejsca włączania fruktozy i galaktozy do glikolizy

(dwie, jeśli prowadzimy bilans dla całej cząsteczki glukozy). Efektem usunięcia reszty fosforanowej z fosfoenolopirogronianu jest trójwęglowy **pirogronian**, czyli anion kwasu pirogronowego.

fosfoenolopirogronian → pirogronian + ATP

Pirogronian jest końcowym produktem glikolizy. Może podlegać wielu różnorodnym przemianom, prowadzącym do różnych efektów końcowych. Szerzej ten temat omówiono w następnym rozdziale.

Bilans glikolizy

Podsumowując przebieg glikolizy, można ją ogólnie podzielić na **dwie fazy**. Pierwsza z nich ma na celu aktywację cukru sześciowęglowego, co wiąże się z wydatkowaniem energii. Aktywowana heksoza rozpada się następnie do dwóch cząsteczek triozy. Trioza ta jest w trakcie drugiej fazy utleniana do kwasu karboksylowego i ostatecznie do pirogronianu. W fazie tej bierze udział NAD^+, który ulega redukcji do **NADH**. Powstaje również **ATP** (druga faza przynosi zysk energetyczny).

W efekcie glikolizy z jednej cząsteczki sześciowęglowej glukozy powstają zatem dwie trójwęglowe cząsteczki pirogronianu. Z każdej z nich powstaje jedna cząsteczka zredukowanego przenośnika wodoru i elektronów, czyli **NADH**. Łącznie zatem powstają dwie cząsteczki NADH. Przemiany każdej cząsteczki trójwęglowej dostarczają też po dwie cząsteczki ATP, czyli z jednej cząsteczki glukozy powstają łącznie cztery cząsteczki ATP. Ponieważ jednak dwie cząsteczki ATP zostały wykorzystane do fosforylacji cząsteczki sześciowęglowej przed jej podziałem, **zysk energetyczny** glikolizy wynosi tylko dwie cząsteczki ATP. To bardzo mało, ale jak już wspomniano, glikoliza może zachodzić w warunkach beztlenowych. Jest wtedy jedynym źródłem energii, musi więc być przeprowadzana pomimo niewielkiego zysku energetycznego. Z kolei w **oddychaniu tlenowym** glikoliza stanowi tylko pierwszy etap. Umożliwia on dalsze przemiany związku organicznego, podczas których uwalniana jest większość energii.

Sumaryczne równanie glikolizy przedstawia się następująco:

glukoza + 2 ADP + 2 Pi + 2 NAD^+ →
2 pirogronian + 2 ATP + 2 NADH + 2 H^+ + H_2O

PODSUMOWANIE

- Oddychanie komórkowe może zachodzić w sposób tlenowy lub beztlenowy (fermentacja).
- Oddychanie tlenowe składa się z glikolizy, cyklu Krebsa i utleniania w łańcuchu oddechowym.
- Glikoliza to proces wstępnego utleniania glukozy, który dostarcza stosunkowo mało energii (jest jednak niezależny od obecności tlenu).
- Pierwsza faza glikolizy polega na fosforylacji glukozy, co wymaga wydatku energii z ATP.
- W drugiej fazie glikolizy cukier sześciowęglowy ulega rozpadowi na dwie cząsteczki trójwęglowe.
- W trzeciej fazie glikolizy cząsteczki aldehydu 3-fosfoglicerynowego są przetwarzane w pirogronian, czemu towarzyszy wytworzenie ATP i NADH.

ZADANIA

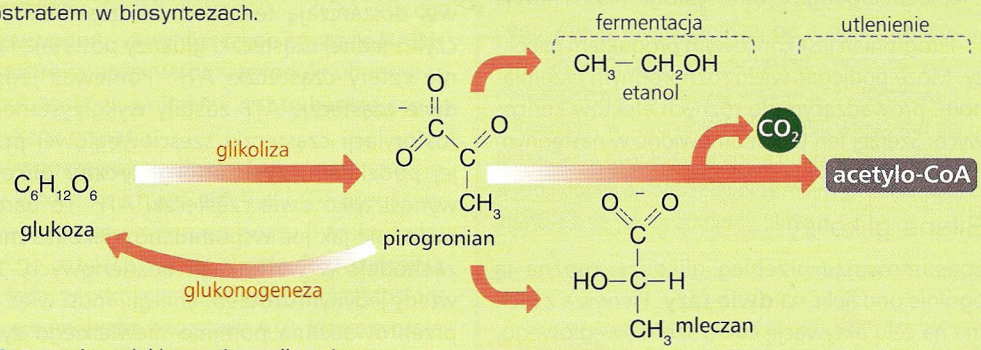
1. Wymień etapy oddychania tlenowego, którego substratem jest glukoza.
2. Scharakteryzuj podstawowe różnice między oddychaniem tlenowym i beztlenowym.
3. Określ, w jakiej części komórki zachodzi glikoliza.
4. Podczas glikolizy wstępne przygotowanie glukozy wymaga wydatkowania dwóch cząsteczek ATP, a reakcje aldehydu 3-fosfoglicerynowego dostarczają dwie cząsteczki ATP. Wyjaśnij, dlaczego zysk glikolizy wynosi dwie cząsteczki ATP.
5. Określ, w którym momencie glikolizy NAD^+ jest redukowany do NADH, i podaj, ile cząsteczek ulega redukcji.

BIBLIOGRAFIA

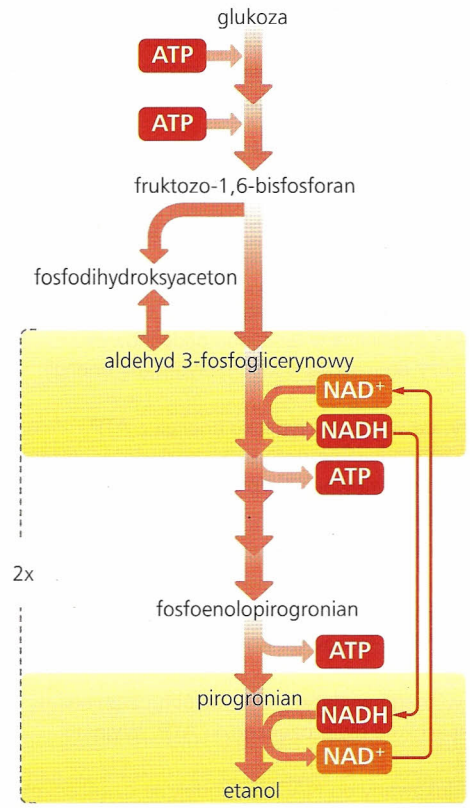
- Hames D., Hooper N., *Biochemia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

8. Metabolizm pirogronianu

Powstały pod koniec glikolizy **pirogronian** jest jednym z kluczowych elementów metabolizmu **(8.1.)**. Jako taki może być przekształcany w szlakach metabolicznych, których efekty końcowe są całkowicie różne. Wiele z nich jest związanych z uzyskiwaniem energii, ale pirogronian może też być substratem w biosyntezach.



8.1. Przemiany, jakim może podlegać pirogronian powstały podczas glikolizy.



8.2. Reakcje utleniania i redukcji NAD^+ podczas fermentacji alkoholowej

? Wymień procesy, które nie będą mogły zachodzić przy niedoborze NAD^+.

Efekty glikolizy

Efektem przemian glukozy w trakcie glikolizy było powstanie **pirogronianu**, **ATP**, **NADH** i **wody**. ATP jest natychmiast zużywany, co stanowi jeden z podstawowych celów przeprowadzania glikolizy przez organizm. Woda to powszechny związek, łatwo usuwany z komórki i wykorzystywany w wielu reakcjach – jej nadmiar nie stanowi zatem problemu. Natomiast ani pirogronian, ani NADH nie mogą gromadzić się w komórce. Spowodowałoby to niekorzystne zmiany (np. zaburzenie równowagi osmotycznej). Ponadto NADH w formie zredukowanej nie może brać udziału w glikolizie, a zawartość NAD^+ w komórce jest ograniczona. **NADH** musi zatem zostać utleniony z powrotem do **NAD^+**, w przeciwnym wypadku po pewnym czasie glikoliza stanie się niemożliwa.

Fermentacja

Najprostszym sposobem radzenia sobie z nadmiarem pirogronianu i utlenianiem NADH do NAD^+ jest **fermentacja**. Proces ten to glikoliza uzupełniona o jedną lub kilka dodatkowych reakcji. Dochodzi w nich do przeniesienia atomów wodoru i elektronów z **NADH** z powrotem na **pirogronian**. Odtworzony NAD^+ może zostać wykorzystany do rozkładu kolejnych cząsteczek glukozy **(8.2.)**, a związek powstały w wyniku redukcji pirogronianu

jest wydalany z komórki. Nie powoduje w związku z tym negatywnych konsekwencji dla procesów przebiegających w jej wnętrzu.

Fermentacja jest procesem typowym dla organizmów żyjących w **warunkach beztlenowych**. Z powodu braku tlenu pirogronian nie może być przez nie wykorzystany do wytworzenia energii. Jej głównym źródłem jest wówczas glikoliza, której ciągłe prowadzenie umożliwia regeneracja NAD^+ i pozbycie się pirogronianu z komórki. Podczas fermentacji powstaje tyle samo energii, co podczas glikolizy (ich bilans jest zatem taki sam). Jedynym zadaniem dodatkowych reakcji zachodzących w trakcie fermentacji jest usunięcie zbędnych produktów glikolizy. W związku z dużą różnorodnością organizmów występujących w warunkach beztlenowych i wieloma możliwościami dalszych przekształceń związku powstałego po redukcji pirogronianu, końcowe efekty fermentacji mogą być bardzo różne. Typy fermentacji są nazywane od ich końcowego produktu wydalanego z komórki do środowiska. Szczegółowo omówione zostaną dwa, mające największe znaczenie w przyrodzie i gospodarce człowieka.

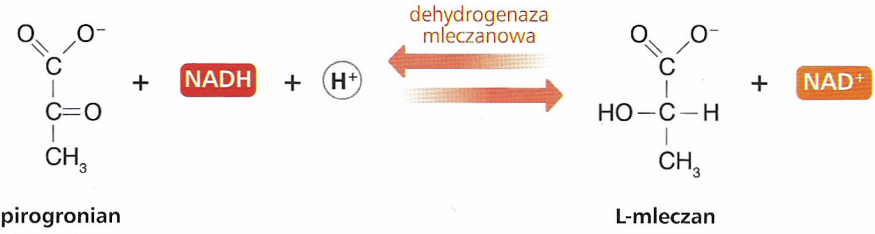
Fermentacja mleczanowa

To najczęstszy i najprostszy typ fermentacji. W jej trakcie wodór i elektrony z NADH są przenoszone bezpośrednio na pirogronian i nie zachodzą jakiekolwiek inne reakcje. Efektem jest powstanie **mleczanu** (kwasu mlekowego) i regeneracja NAD^+ **(8.3.)**.

Schematyczny zapis całej fermentacji mleczanowej przedstawia się następująco:

glukoza + 2 ADP + 2 Pi → 2 mleczan + 2 ATP + 2 H^+

Fermentacja mleczanowa (mlekowa) występuje u wielu **bakterii (8.5.)** (np. należących do rodzaju *Lactobacillus* i pokrewnych). Wydzielają one powstały kwas mlekowy do środowiska, co powoduje między innymi kwaśnienie mleka **(8.4.)**, ogórków i kapusty. Bakterie te są również odpowiedzialne za powstawanie zakwasu chlebowego. **Fermentacja mlekowa** zachodzi

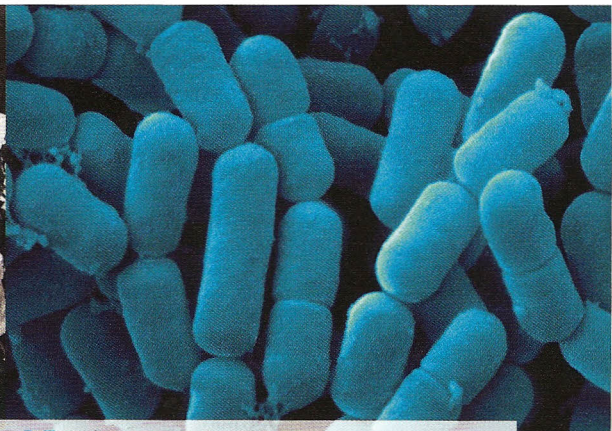


pirogronian **L-mleczan**

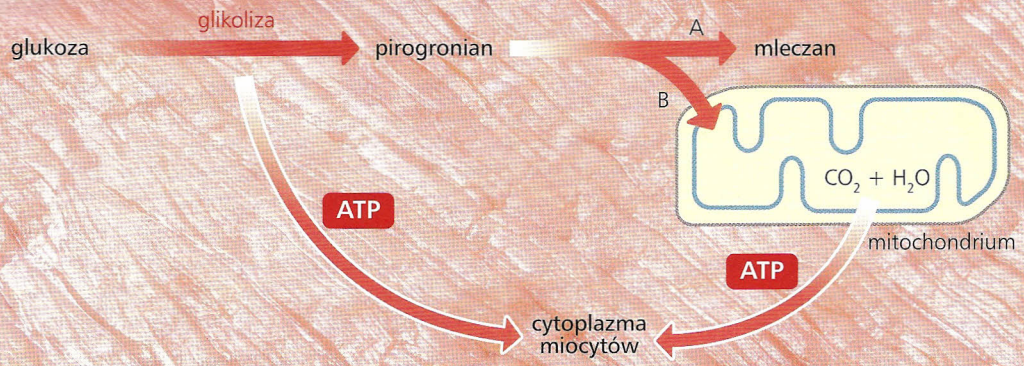
8.3. Reakcja redukcji pirogronianu w fermentacji mleczanowej



8.4. Twaróg jest uzyskiwany z kwaśnego mleka, więc również powstaje w wyniku fermentacji mleczanowej.



8.5. Bakterie *Lactobacillus* sp.



8.6. Produkcja energii w mięśniu: podczas umiarkowanego wysiłku dostępna jest duża ilość tlenu i zachodzi oddychanie tlenowe (B); podczas bardzo intensywnego wysiłku tlenu brakuje i zachodzi fermentacja mleczanowa (A).

też w **mięśniach szkieletowych** podczas intensywnego wysiłku **(8.6.)**. Układ krwionośny nie jest wtedy w stanie dostarczyć do mięśni ilości tlenu wystarczającej dla utrzymania oddychania tlenowego. Uzyskują one wówczas energię na drodze fermentacji mleczanowej, czego efektem jest gromadzenie się w nich kwasu mlekowego. Stosunkowo szybko jest on jednak wydzielany do krwi, którą dociera do wątroby, gdzie zostaje przekształcony z powrotem w glukozę na drodze glukoneogenezy (patrz: niżej). Kwas mlekowy powstaje też w erytrocytach – nie posiadają one mitochondriów, więc energię mogą uzyskiwać tylko na drodze beztlenowej fermentacji. Ma to tę zaletę, że nie zużywają transportowanego przez siebie tlenu.

Fermentacja alkoholowa

To trochę rzadszy i bardziej skomplikowany typ fermentacji **(8.7.)**. W odróżnieniu od fermentacji mleczanowej, przemiany pirogronianu i NADH przebiegają tu w dwóch etapach. Pierwszym z nich jest **dekarboksylacja**, czyli odłączenie od pirogronianu cząsteczki dwutlenku węgla. Następnie powstały aldehyd octowy jest redukowany przez NADH do **etanolu** (stąd nazwa „fermentacja alkoholowa") **(8.8.)**.

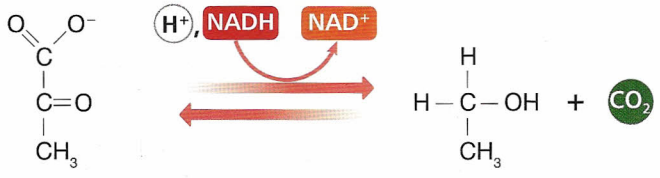
Schematyczny zapis całej fermentacji alkoholowej przedstawia się następująco:

$$\text{glukoza} + 2\ \text{ADP} + 2\ \text{Pi} \rightarrow 2\ \text{etanol} + 2\ CO_2 + 2\ \text{ATP} + 2\ H^+$$

Jak widać, efekt energetyczny fermentacji alkoholowej jest taki sam, jak efekt fermentacji

:: Ciekawostka

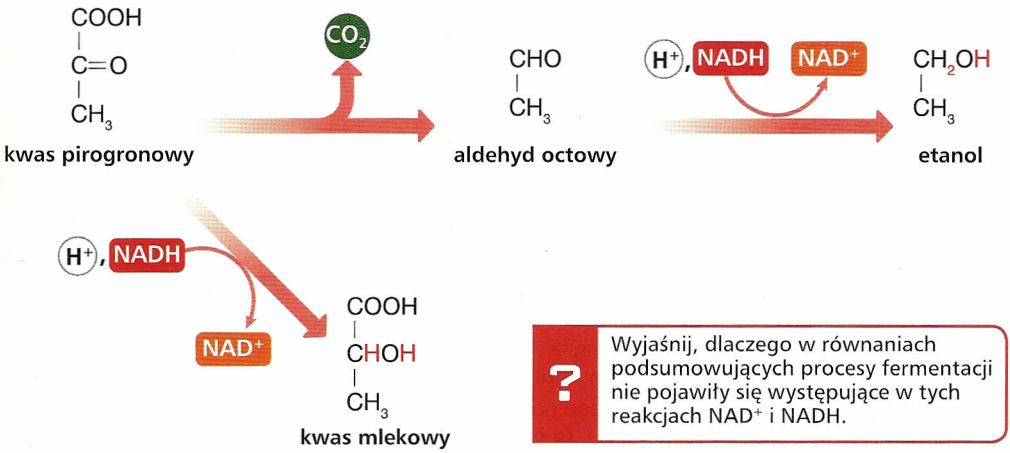
Wbrew popularnej teorii, „zakwasów" (czyli bólu mięśni po wysiłku) nie powoduje kwas mlekowy. Związek ten jest bardzo szybko usuwany z mięśni i metabolizowany. Prawdziwymi przyczynami bólu są mikrourazy włókien mięśniowych, uszkodzonych przez intensywny wysiłek, i związany z tym stan zapalny.



pirogronian **etanol**

8.7. Przebieg fermentacji alkoholowej

mleczanowej i glikolizy. Jedynymi różnicami są przebieg tych procesów i ich końcowe produkty – mleczan w fermentacji mleczanowej i etanol w alkoholowej. Fermentacja alkoholowa występuje głównie u **grzybów**, w tym u drożdży. Stanowią one główne źródło alkoholu etylowego i wykorzystywane są w przemyśle spożywczym (np. do produkcji piwa i wina).



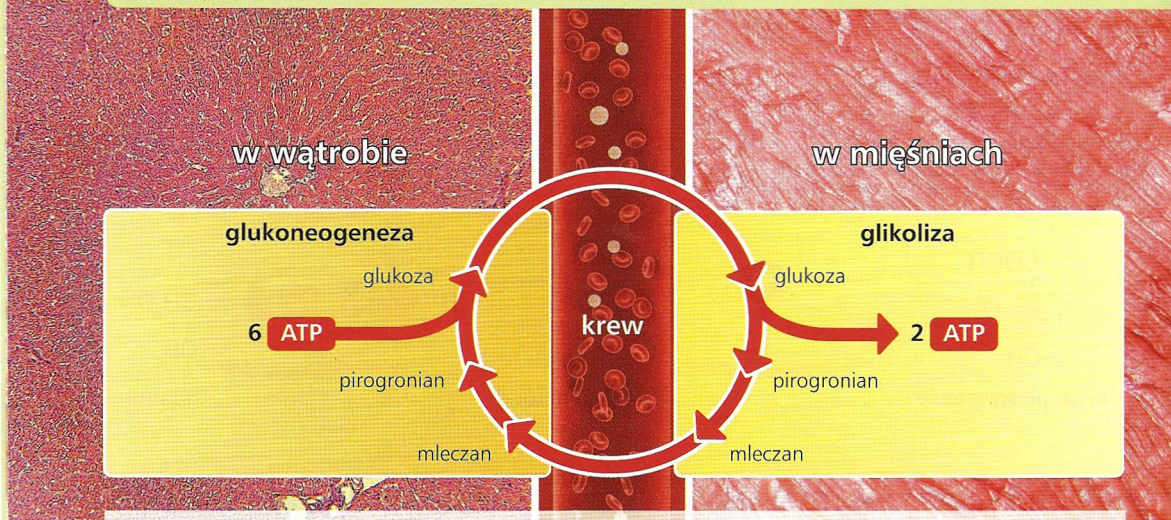
? Wyjaśnij, dlaczego w równaniach podsumowujących procesy fermentacji nie pojawiły się występujące w tych reakcjach NAD^+ i NADH.

8.8. Porównanie procesów regeneracji NAD^+ w fermentacji mleczanowej i alkoholowej

Glukoneogeneza

Glukoneogeneza to proces pozwalający na przekształcenie pirogronianu z powrotem w glukozę. Zwykle organizm nie wykorzystuje w ten sposób pirogronianu powstałego w glikolizie, ponieważ prowadziłoby to do cofnięcia jej efektów (lepiej byłoby więc jej w ogóle nie przeprowadzać). **Glukoneogeneza** jest poza tym bardzo kosztowna energetycznie: odtworzenie jednej cząsteczki glukozy wymaga zużycia aż sześciu cząsteczek **ATP**, podczas gdy cały zysk z glikolizy to dwie cząsteczki ATP! Dodatkowo dwie cząsteczki **NADH** (czyli tyle, ile powstaje podczas glikolizy) są utleniane do NAD^+. Należy też pamiętać, że z każdych dwóch trójwęglowych cząsteczek pirogronianu w glukoneogenezie powstaje jedna sześciowęglowa cząsteczka **glukozy**. Jest to sytuacja odwrotna do glikolizy, gdzie z jednej cząsteczki związku sześciowęglowego (glukoza) powstawały dwie cząsteczki związku trójwęglowego (pirogronian).

Szlak glukoneogenezy jest dość skomplikowany i nie polega na prostym odwróceniu glikolizy. Zachodzi w nim o jedną reakcję więcej niż w glikolizie, inna jest połowa uczestniczących w nim enzymów, ale większość produktów pośrednich jest identyczna jak podczas rozkładu glukozy. Tak znaczne oddzielenie obu procesów, mimo ich bliskiego związku, jest konieczne ze względu na regulację intensywności każdego z nich. Dla zrozumienia glukoneogenezy bardzo ważna jest pierwsza reakcja całego szlaku, polegająca na przekształceniu **pirogronianu** w **szczawiooctan**. Szczawiooctan jest następnie zamieniany w fosfoenolopirogronian. W glikolizie służyła do tego celu tylko jedna reakcja – fosfoenolopirogrionan był od razu przekształcany w pirogronian. Taka reakcja może jednak zachodzić tylko w jednym kierunku, dlatego w glukoneogenezie ta przemiana jest prowadzona okrężną, dłuższą drogą. Pozwala to na wykorzystanie do syntezy glukozy nie tylko pirogronianu, lecz także innych związków, które można przekształcić w szczawiooctan. Należą do nich niektóre aminokwasy, zatem dzięki glukoneogenezie jest możliwa synteza glukozy z aminokwasów.



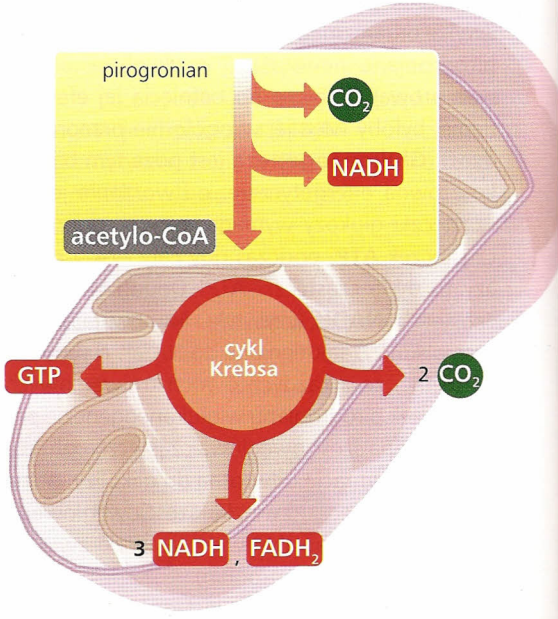
8.9. Powiązanie fermentacji mleczanowej i glukoneogenezy w organizmie człowieka

Jedną z najważniejszych funkcji glukoneogenezy w organizmie człowieka jest odtwarzanie **glukozy** z **kwasu mlekowego** powstałego podczas fermentacji mleczanowej w mięśniach **(8.9.)**. Odpowiada za to wątroba, do której kwas mlekowy jest za pośrednictwem krwi transportowany wprost z mięśni. W wątrobie kwas mlekowy jest utleniany do pirogronianu, powstaje przy tym zredukowana cząsteczka NADH. Pirogronian i NADH są następnie zużywane podczas glukoneogenezy. Odtworzona glukoza jest uwalniana do krwi, skąd trafia z powrotem do mięśni i może być wykorzystana w oddychaniu tlenowym lub kolejnej fermentacji mleczanowej. Glukoza ta może też być na miejscu, w wątrobie, użyta do produkcji **glikogenu**.

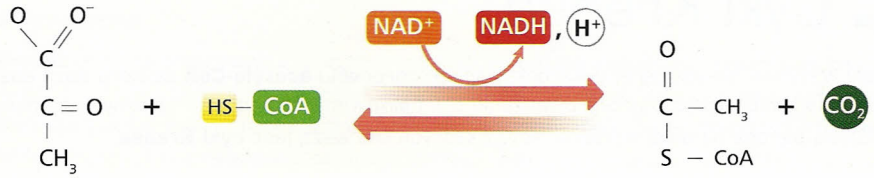
Oksydacyjna dekarboksylacja pirogronianu

Ostatnia z możliwych przemian pirogronianu jest w rzeczywistości pierwszym etapem znacznie bardziej skomplikowanych szlaków metabolicznych, składających się na **oddychanie tlenowe (8.10.)**. W przeciwieństwie do wcześniej opisywanych przemian, zachodzi ona nie w cytoplazmie, a w **mitochondriach**. Powstały w procesie glikolizy pirogronian jest transportowany do wnętrza mitochondrium za pomocą specjalnych białek przenośnikowych. Nie dochodzi wówczas do utleniania **NADH** (tworzą się nawet dodatkowe cząsteczki tego związku), jest on bowiem wykorzystywany na dalszym etapie oddychania tlenowego.

Proces ten to **oksydacyjna dekarboksylacja pirogronianu** lub inaczej – **reakcja pomostowa**. Pomimo dość skomplikowanego mechanizmu przemian (w rzeczywistości zachodzą tu trzy reakcje, katalizowane przez różne enzymy), zasada reakcji pomostowej jest bardzo prosta. Najpierw od pirogronianu odłączany jest dwutlenek węgla (dekarboksylacja). Następnie na każdą



8.10. Oksydacyjna dekarboksylacja pirogronianu łączy glikolizę z cyklem Krebsa.



8.11. Powstanie acetylo-CoA

przekształconą cząsteczkę pirogronianu redukcji ulega jedna cząsteczka **NAD⁺**. Zatem na jedną cząsteczkę glukozy, która została przekształcona w glikolizie, powstają dwie cząsteczki NADH. Powstała w wyniku dekarboksylacji i utleniania **grupa acylowa** łączy się z **koenzymem A**, w wyniku czego tworzy **acetylo-CoA (8.11.)**. Ważną cechą oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu jest jej nieodwracalność (tzn. że nie można odtworzyć pirogronianiu z acetylo-CoA). Ma to wiele konsekwencji. Przede wszystkim, nie jest możliwe przeprowadzenie **glukoneogenezy** z udziałem acetylo-CoA ani też wykorzystanie go w fermentacjach. W związku z tym acetylo-CoA uczestniczy dalej w przemianach tlenowych. Pierwszą z nich jest **cykl Krebsa**.

PODSUMOWANIE

- Pochodzący z glikolizy NADH musi zostać zredukowany do NAD⁺. Może się to odbywać podczas dalszego utleniania tlenowego, glukoneogenezy lub fermentacji.
- Fermentacja to glikoliza uzupełniona o reakcje przeniesienia wodoru i elektronów z NADH na pirogronian.
- W zależności od typu fermentacji jej efektem jest powstanie kwasu mlekowego (fermentacja mleczanowa) lub etanolu (fermentacja alkoholowa).
- Zysk energetyczny z fermentacji jest równy zyskowi z glikolizy, fermentacja może jednak zachodzić stale w warunkach beztlenowych.
- Glukoneogeneza umożliwia odtworzenie glukozy z pirogronianu kosztem dużej ilości energii.
- Podczas oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu jest on rozkładany na CO_2 i acetylo-CoA. Powstaje też jedna cząsteczka NADH.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego mimo takiego samego bilansu energetycznego glikolizy i fermentacji, w warunkach beztlenowych komórki przeprowadzają bardziej skomplikowaną fermentację.
2. Wyjaśnij, w jaki sposób wątroba współdziała z mięśniami w celu zapewnienia im stałego dopływu glukozy w warunkach niedoboru tlenu.
3. Wyjaśnij, w jaki sposób możliwa jest synteza glukozy z niektórych aminokwasów.
4. Podaj, ile cząsteczek NAD⁺ ulega redukcji do NADH podczas przemiany prowadzącej od glukozy do acetylo-CoA.
5. Przygotuj prezentację, w której przedstawisz występowanie fermentacji mleczanowej i alkoholowej w przyrodzie oraz ich rolę w życiu człowieka.
6. Wyszukaj w swoim otoczeniu produkty, które powstały podczas fermentacji.

BIBLIOGRAFIA

- Kawalec M., *Najeść się bakterii [online]*, „Wiedza i Życie" 1999, nr 7. Dostępny w internecie: http://archiwum.wiz.pl/1999/99072800.asp.
- Leja K., *Produkcja bioetanolu z biomasy. Fermentacja etanolowa*, „Ekonatura" 2011, nr 2.

9. Cykl Krebsa

Powstały w wyniku oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu **acetylo-CoA** zawiera dużo energii. Do jej uwolnienia konieczne jest przeprowadzenie skomplikowanych procesów zależnych od obecności tlenu. Dzielą się one na dwie wyraźne fazy, z których pierwszą jest **cykl Krebsa**.

Ogólna charakterystyka cyklu Krebsa

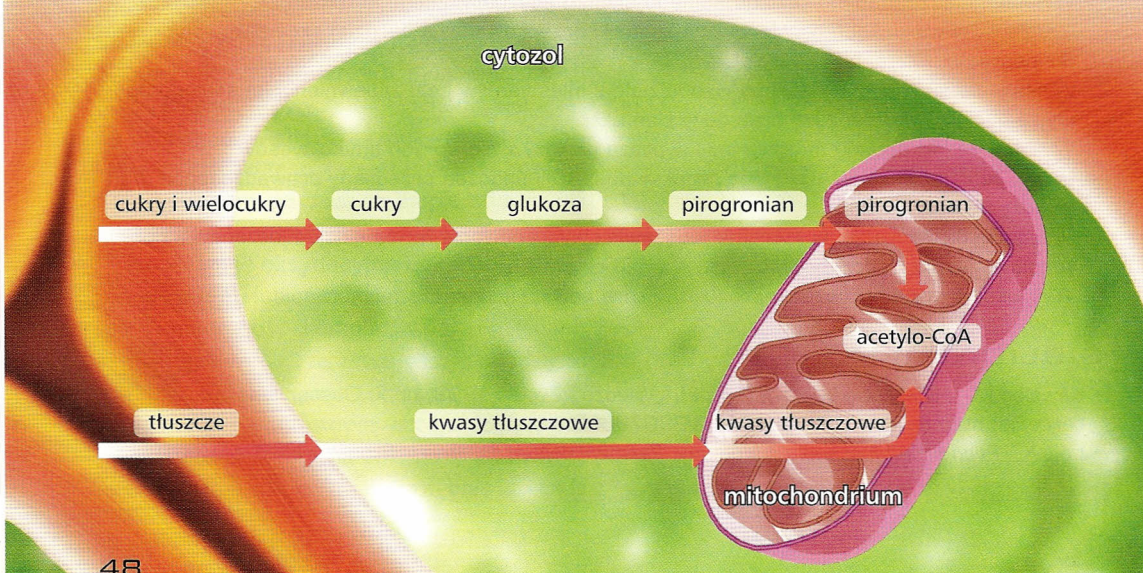
Nazwa **cykl Krebsa** pochodzi od nazwiska jego odkrywcy: **Hansa Adolfa Krebsa**, który za swoje badania w 1953 roku otrzymał Nagrodę Nobla. Ten typowy cykl przemian metabolicznych jest również nazywany **cyklem kwasu cytrynowego** (od produktu pierwszej zachodzącej w nim reakcji) lub **cyklem kwasów trikarboksylowych** (TCA). Właściwym jego substratem jest **acetylo-CoA**. Podczas pierwszej reakcji związek ten zostaje przyłączony do cząsteczki **szczawiooctanu**. Zadaniem tej cząsteczki (zwanej akceptorem) jest umożliwienie przemian acetylo-CoA. W efekcie połączenia grupy acetylowej powstaje cytrynian (anion kwasu cytrynowego). Pod koniec cyklu szczawiooctan jest regenerowany i może przyłączyć następną cząsteczkę acetylo-CoA.

Cykl Krebsa zajmuje centralne miejsce w katabolizmie komórki. Zbiegają się w nim szlaki metaboliczne, których zadaniem jest uzyskiwanie energii z różnych typów związków organicznych. Tak więc przemiany glukozy podczas glikolizy prowadziły do powstania pirogronianu, który poprzez oksydacyjną dekarboksylację jest przetwarzany w acetylo-CoA i może zostać włączony do cyklu Krebsa. Acetylo-CoA jest również końcowym efektem szlaku metabolizującego kwasy tłuszczowe **(9.1.)**. Zatem tłuszcze także są wykorzystywane podczas cyklu Krebsa, a droga wytworzonego z nich acetylo-CoA jest w cyklu taka sama, jak powstałego z węglowodanów. Uzyskiwanie energii z aminokwasów, w związku z dużym zróżnicowaniem ich budowy, jest bardziej skomplikowane. Jednak przemiany te również prowadzą do cyklu Krebsa.

Tylko niewielka ilość energii jest wytwarzana bezpośrednio w cyklu Krebsa – zaledwie jedna cząsteczka GTP na cząsteczkę acetylo-CoA. Zarówno energia wiązań, jak i sposób tworzenia GTP są takie same, jak w przypadku ATP. Można zatem traktować te związki jako równoważne, tym bardziej że reszta fosforanowa może zostać bardzo łatwo przeniesiona z GTP na ADP.

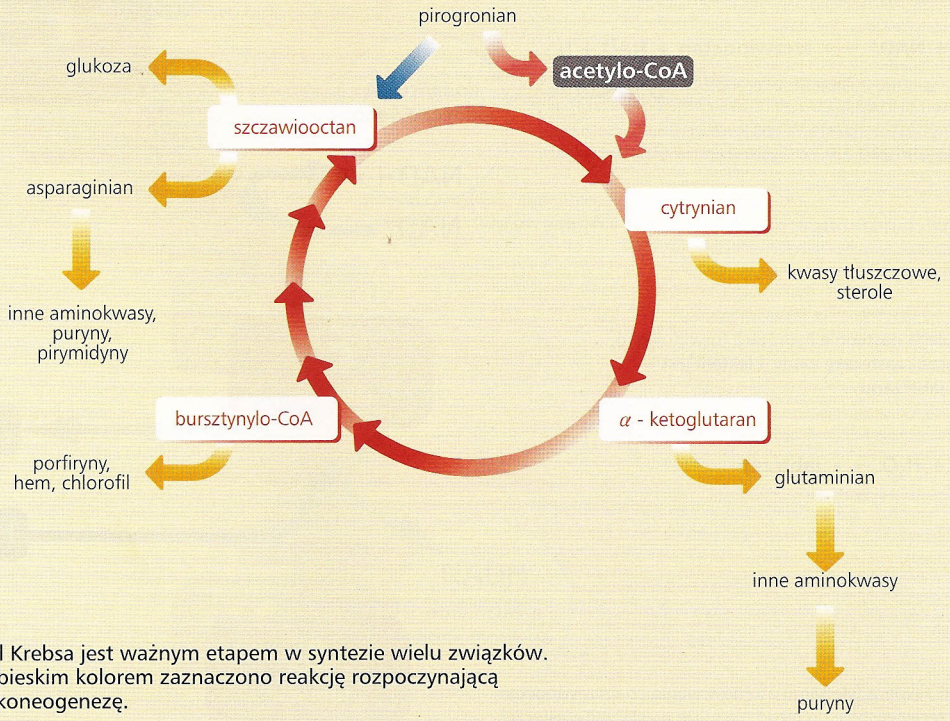
$$GTP + ADP \rightarrow GDP + ATP$$

9.1. Procesy prowadzące do powstania acetylo-CoA wraz z miejscami, w których zachodzą.



:: Ciekawostka

Cykl Krebsa jest najważniejszym z procesów katabolicznych, ale większość z powstających w jego trakcie produktów pośrednich może zostać wykorzystana również w reakcjach anabolicznych (np. szczawiooctan i α-ketoglutaran służące do produkcji aminokwasów). Jak przypuszczają naukowcy, cykl Krebsa powstał najprawdopodobniej z połączenia pierwotnie niezależnych reakcji o różnym charakterze. Przynajmniej niektóre z nich były biosyntezami, a więc reakcjami anabolicznymi. Jest to kolejny przykład bliskich związków anabolizmu i katabolizmu.



Cykl Krebsa jest ważnym etapem w syntezie wielu związków. Niebieskim kolorem zaznaczono reakcję rozpoczynającą glukoneogenezę.

Od przemian zachodzących podczas cyklu Krebsa zależy produkcja energii w komórce, więc powstająca jedna cząsteczka GTP na cząsteczkę acetylo-CoA to bardzo mało. Właściwe zadania cyklu Krebsa to jednak rozkład związków organicznych i związanie ich energii w postaci aktywowanych przenośników elektronów i wodoru, czyli NADH i $FADH_2$. Związki te są wykorzystywane w następnym etapie oddychania, czyli podczas utleniania w łańcuchu oddechowym. Właśnie w trakcie tego procesu tworzy się ATP, co jednak nie byłoby możliwe bez powstania w cyklu Krebsa zredukowanych przenośników elektronów i wodoru. Cykl ten odgrywa zatem ogromną rolę w produkcji energii.

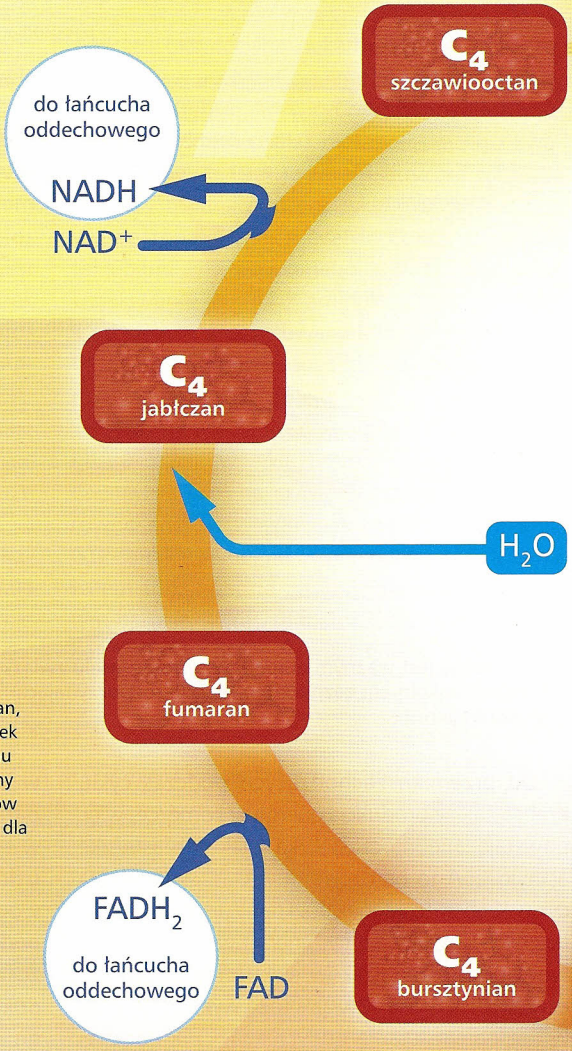
Jako element oddychania tlenowego cykl Krebsa nie zachodzi bez obecności tlenu (np. w intensywnie pracujących mięśniach). Jednak, paradoksalnie, tlen jest wykorzystywany nie w trakcie samego cyklu, lecz później – podczas **utleniania w łańcuchu oddechowym**. Gdyby wówczas zabrakło tlenu, NADH i $FADH_2$ (czyli podstawowe produkty cyklu Krebsa) nie mogłyby zostać utlenione. Uniemożliwiłoby to dalszą produkcję energii, szybko bowiem doszłoby do nagromadzenia zredukowanych form przenośników (NADH, $FADH_2$) i wyczerpania się ich form utlenionych (NAD^+, FAD). W związku z tym niemożliwe są te reakcje cyklu Krebsa, w których dochodzi do **redukcji przenośników** (podobna blokada występuje również w glikolizie). Ponieważ przekazanie elektronów z tlenu na przenośniki jest jedynym sposobem ich regeneracji, cykl Krebsa przestaje działać, gdy tlenu zabraknie.

CYKL KREBSA

Cały **cykl Krebsa**, podobnie jak wcześniej oksydacyjna dekarboksylacja pirogronianu, odbywa się w macierzy (matriks) mitochondrium. Jest w nim stopniowo rozkładana reszta acetylowa (zwarta w acetylo-CoA) powstała z glukozy, tłuszczów lub niektórych aminokwasów. Cykl Krebsa rozpoczyna się dołączeniem reszty acetylowej do kwasu szczawiooctowego, a kończy odtworzeniem tego kwasu.

Ostatnią reakcją cyklu Krebsa jest utlenienie **jabłczanu** do **szczawiooctanu**. Dochodzi w niej do redukcji kolejnej cząsteczki NAD^+ do NADH. Powstały szczawiooctan jest zdolny do przyłączenia kolejnej cząsteczki acetylo-CoA. Reakcja ta pozwala na rozpoczęcie cyklu Krebsa od nowa.

jabłczan + NAD^+ ⟶ szczwiooctan + NAD + H^+



Fumaran ulega następnie hydratacji (uwodnieniu), czyli przyłącza cząsteczkę wody. Efektem jest powstanie **jabłczanu**.

fumaran + H_2O ⟶ jabłczan

Bursztynian zawiera tyle samo atomów węgla co szczawiooctan, jednak w przeciwieństwie do niego nie może przyłączać cząsteczek acetylo-CoA. **Szczawiooctan** musi zostać zregenerowany i temu służą kolejne reakcje. W pierwszej z nich bursztynian jest utleniany do fumaranu. Tworzy się też zredukowany przenośnik elektronów i wodoru. Energia wiązanych elektronów jest jednak zbyt mała dla utworzenia NADH – wystarcza tylko do redukcji FAD do $FADH_2$.

bursztynian + FAD ⟶ fumaran + $FADH_2$

Energia wiązania wysokoenergetycznego w **bursztynylo-CoA** jest następnie wykorzystywana do przeprowadzenia fosforylacji substratowej – to jedyna taka reakcja w całym cyklu Krebsa. Koenzym A jest odłączany, a energia jego wiązania pozwala na utworzenie GTP z GDP i Pi. Bursztynylo-CoA ulega równocześnie przemianie w **bursztynian**.

bursztynylo-CoA + GDP + P_i ⟶ bursztynian + GTP

W pierwszej reakcji cyklu reszta acetylowa przenoszona jest z **acetylo-CoA** na **kwas szczawiooctowy** (**szczawiooctan**). W reakcji tej zużywana jest też cząsteczka wody. **Koenzym A** jest uwalniany, a na skutek połączenia dwuwęglowej reszty acetylowej i czterowęglowego kwasu szczawiooctowego powstaje sześciowęglowy **kwas cytrynowy** (**cytrynian**).

szczawiooctan + acetylo-CoA + H_2O ⟶ cytrynian + CoA

Cytrynian ulega izomeryzacji do **izocytrynianu**, a ten ulega utlenieniu i dekarboksylacji. Powstaje NADH i uwalnia się cząsteczka dwutlenku węgla. W efekcie izocytrynian przekształca się w pięciowęglowy **α-ketoglutaran**.

izocytrynian + NAD^+ ⟶ α-ketoglutaran + NADH + H^+

W kolejnej reakcji **α-ketoglutaran** ulega oksydacyjnej dekarboksylacji, bardzo podobnej do tej z udziałem pirogronianu. Jak w przypadku tamtej reakcji, powstaje NADH, wydziela się CO_2, a powstały związek (czterowęglowy bursztynian) jest wiązany wiązaniem wysokoenergetycznym z koenzymem A. W wyniku tego powstaje **bursztynylo-CoA**.

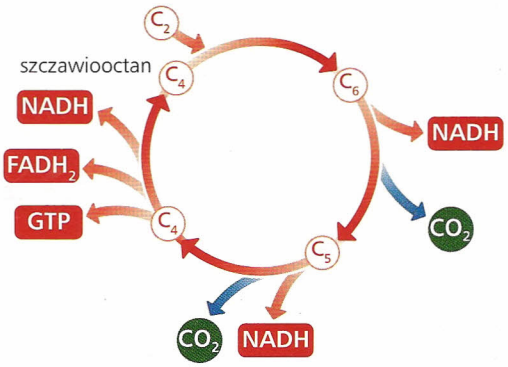
α-ketoglutaran + CoA + NAD^+ ⟶ bursztynylo-CoA + NADH + H^+

? Wskaż reakcje, które najszybciej przestaną zachodzić, gdy zabraknie tlenu.

Bilans cyklu Krebsa

Powyższe reakcje pozwalają stwierdzić, że cykl Krebsa **(9.2.)** polega na stopniowym **utlenieniu** i **dekarboksylacji** dwuwęglowego fragmentu wchodzącego w skład acetylo-CoA. Szczawiooctan jest zarówno **substratem**, jak i **produktem** cyklu Krebsa, więc można go pominąć przy podsumowaniu. Zatem ogólne równanie reakcji zachodzących podczas tego cyklu przedstawia się następująco:

$$\text{acetylo-CoA} + 3\ NAD^+ + FAD + GDP + Pi + 2\ H_2O \rightarrow 2\ CO_2 + 3\ NADH + 3\ H^+ + FADH_2 + GTP + CoA$$



9.2. Schemat cyklu Krebsa, który uwzględnia zmiany liczby atomów węgla w cząsteczkach ulegających przemianom (C_2, C_4, C_5, C_6).

Prawdziwe zatem okazuje się wcześniejsze stwierdzenie, że cykl Krebsa dostarcza bezpośrednio mało energii. Zachodzi w nim wiele reakcji, ale ich efektem jest powstanie tylko jednej cząsteczki GTP na cząsteczkę acetylo-CoA. Dla jednej cząsteczki **glukozy**, która rozpoczęła przemiany w glikolizie, daje to zaledwie dwie cząsteczki **GTP** (tyle samo wynosił zysk netto z glikolizy – dwie cząsteczki ATP). Natomiast w porównaniu z glikolizą powstaje znacznie więcej zredukowanych przenośników elektronów i wodoru. Na jedną cząsteczkę acetylo-CoA przypadają trzy cząsteczki NADH i jedna cząsteczka $FADH_2$. Zatem na całą cząsteczkę glukozy w cyklu Krebsa powstaje aż sześć cząsteczek **NADH** i dwie cząsteczki **$FADH_2$**. W trakcie oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu, a następnie cyklu Krebsa, całkowitemu rozkładowi uległ pochodzący z glukozy **łańcuch węglowy**. Pozostały z niego jedynie elektrony i wodór związane w zredukowanych cząsteczkach NADH i $FADH_2$ (ich przemiany obejmie następny etap oddychania komórkowego). Węgiel i tlen wchodzące wcześniej w skład związku organicznego zostały natomiast uwolnione do atmosfery w postaci dwutlenku węgla. Do tego, że jest on przez nas wydychany, w największym stopniu przyczyniają się właśnie przemiany zachodzące podczas cyklu Krebsa. Ponieważ jednak zawarty w nim tlen to inne atomy niż te, które budują cząsteczki tlenu wdychane z powietrzem, cykl Krebsa nie wpływa na zużycie tlenu.

PODSUMOWANIE

- Cykl Krebsa to cykl przemian metabolicznych, podczas którego rozkładany jest acetylo-CoA pochodzący z glikolizy i przemian innych związków organicznych.
- Acetylo-CoA jest przyłączany do cząsteczki szczawiooctanu, w wyniku czego powstaje cytrynian. Do zamknięcia cyklu konieczna jest regeneracja szczawiooctanu.
- Łańcuch węglowy z acetylo-CoA ulega stopniowemu utlenianiu i dekarboksylacji.
- Efektem cyklu Krebsa jest powstanie aż trzech cząsteczek NADH oraz jednej cząsteczki $FADH_2$.
- Podczas cyklu Krebsa zachodzi fosforylacja substratowa. Na cząsteczkę acetylo-CoA powstaje tylko jedna cząsteczka GTP.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego cykl Krebsa ustaje przy braku tlenu.
2. Sporządź tabelę, w której porównasz glikolizę i cykl Krebsa pod względem substratów, produktów i miejsca zachodzenia.
3. Oblicz, ile cząsteczek NADH i $FADH_2$ powstało łącznie w wyniku przemian glukozy podczas glikolizy, oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu i cyklu Krebsa.
4. Wyjaśnij, dlaczego tak ważna jest regeneracja szczawiooctanu pod koniec cyklu Krebsa.

W INTERNECIE

- http://www.szkolnictwo.pl/szukaj,Cykl_kwasu_cytrynowego

10. Fosforylacja oksydacyjna: łańcuch oddechowy

Ostatni etap **oddychania tlenowego** zachodzącego w komórce różni się od poprzednich. W jego trakcie nie zmienia się struktura związków organicznych, ponieważ zostały one rozłożone wcześniej. **Energia** uzyskanych z nich **elektronów** jest wykorzystywana do transportu **protonów** H^+ przez błonę wewnętrzną mitochondrium. Powstała po obu stronach błony różnica stężeń pozwala na syntezę bardzo dużej ilości ATP.

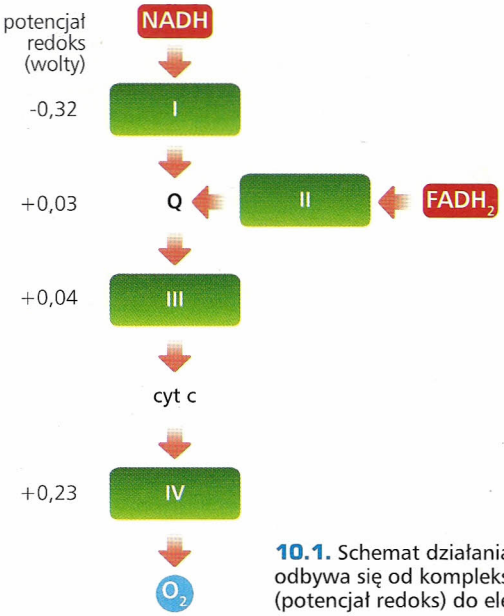
Ogólna charakterystyka utleniania w łańcuchu oddechowym

Kulminacyjnym etapem oddychania komórkowego jest utlenianie w **łańcuchu oddechowym**. W jego trakcie zachodzi **fosforylacja oksydacyjna**, która (w przeciwieństwie do fosforylacji substratowej) jest bardzo efektywnym sposobem syntezy **ATP**. Można stwierdzić, że procesy wcześniej zachodzące były tylko przygotowaniem do uzyskiwania energii w utlenianiu w łańcuchu oddechowym. Wymaga on całkowicie odmiennego mechanizmu reakcji, ponieważ nie dochodzi podczas niego do zmian struktury związków organicznych. Zmiany te zaszły w trakcie wcześniejszych etapów oddychania tlenowego: **glikolizy** (związki zostały wówczas wstępnie rozłożone) i **cyklu Krebsa** (kiedy to nastąpił ich całkowity rozkład).

Utlenianie w łańcuchu oddechowym wykorzystuje energię elektronów związanych wcześniej w **NADH** i **$FADH_2$**. Niezależnie od tego, czy do redukcji tych przenośników doszło podczas glikolizy, oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu, czy cyklu Krebsa, są one wykorzystywane w taki sam sposób. Elektrony z przenośników trafiają do specjalnych białek związanych z wewnętrzną błoną mitochondrium, tworzących **łańcuch oddechowy** (stąd nazwa całego procesu). Następnie elektrony przenoszone są pomiędzy kolejnymi białkami łańcucha. Ostatecznym akceptorem elektronów jest tlen. Oprócz elektronów przyłączają się do niego **protony** H^+ i powstaje cząsteczka wody. Reakcja ta prowadzi do spadku liczby protonów w matriks mitochondrium. Ich liczba spada też podczas wcześniejszego przenoszenia elektronów przez białka łańcucha oddechowego. Dzieje się tak, ponieważ białka te wykorzystują energię elektronów do przepompowania protonów z matriks mitochondrium do przestrzeni między jego zewnętrzną a wewnętrzną błoną. Powoduje to powstanie znacznej różnicy stężeń protonów i ładunków elektrycznych (protony są naładowane dodatnio) między wnętrzem mitochondrium a przestrzenią międzybłonową. Różnica ta jest następnie wykorzystywana do napędzania kompleksu białek odpowiedzialnego za produkcję cząsteczek ATP.

Łańcuch oddechowy

Łańcuch oddechowy to cztery wielkie **kompleksy białkowe** umieszczone w wewnętrznej błonie mitochondrium. Istniejące w niej fałdy (tzw. **grzebienie mitochondrialne**) zwiększają liczbę tych kompleksów. Charakterystycznym elementem białek łańcucha oddechowego jest to, że jako składniki kofaktorów występują w nich jony metali (żelaza i miedzi). Obecność metali skutkuje różnym powinowactwem białek łańcucha oddechowego do elektronów – czyli różnym potencjałem redoks. Potencjał ten odpowiada za łatwość przyłączania i oddawania elektronów. Im wyższy potencjał, tym białko łańcucha oddechowego łatwiej przyłącza elektrony i trudniej je oddaje. Białka ułożone są w łańcuchu kolejno, zgodnie z wzrastającym powinowactwem do elektronów **(10.1.)**. Efektem jest przepływ elektronów od białek



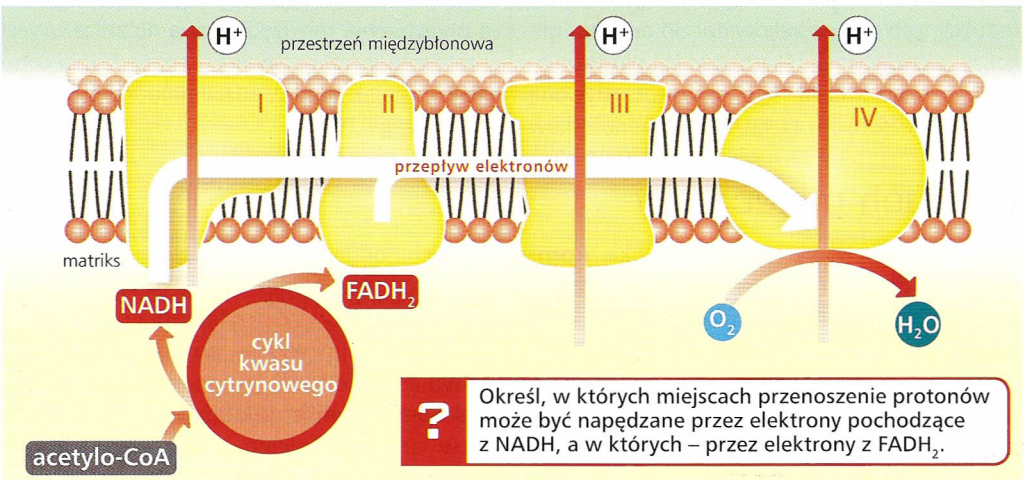
o mniejszym powinowactwie do białek o większym powinowactwie (można powiedzieć, że te ostatnie „wysysają" elektrony z pierwszych). Ten przepływ jest wspomagany przez specjalne nośniki elektronów. Są to niewielkie cząsteczki – **koenzym Q** oraz **cytochrom c**, które przekazują elektrony między głównymi kompleksami łańcucha oddechowego. Ostatni kompleks błonowy przenosi elektrony na cząsteczkę tlenu.

10.1. Schemat działania łańcucha oddechowego: transport elektronów odbywa się od kompleksów białkowych wykazujących niższe powinowactwo (potencjał redoks) do elektronów do tych o wyższym powinowactwie.

Powstawanie gradientu protonów

Celem przenoszenia elektronów przez łańcuch oddechowy jest wykorzystanie ich energii do przetransportowania **protonów** H^+ **(10.2.)**. Transport protonów odbywa się z **matriks mitochodnrium** do przestrzeni między jego zewnętrzną i wewnętrzną błoną, czyli do tak zwanej **przestrzeni międzybłonowej**. Trzy z czterech kompleksów białkowych łańcucha oddechowego pełnią funkcję tzw. pomp protonowych, dodatkowe protony przenosi też koenzym Q.

NADH przekazuje elektrony na samym początku łańcucha, co powoduje przepływ protonów we wszystkich trzech pompach protonowych. Elektrony z $FADH_2$ są włączane przez specjalne białko położone już za pierwszą pompą protonową. Nie mogą zatem napędzać przenoszenia protonów przez pierwszą pompę, gdyż łańcuch działa tylko w jedną stronę. Wkład **$FADH_2$** do powstania różnicy stężeń protonów po obu stronach błony jest w związku z tym



10.2. Powstawanie transbłonowego gradientu protonów

mniejszy niż NADH. Jeden i drugi przenośnik po oddaniu elektronów i protonów przechodzą w formę utlenioną – odpowiednio: NAD^+ i FAD. Cząsteczki te mogą znowu ulec redukcji podczas glikolizy, oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu lub cyklu Krebsa.

Pewien wkład w powstanie gradientu stężeń i różnicy potencjałów po obu stronach błony mitochondrium ma też ostatni etap transportu elektronów. Ich przeniesienie z łańcucha oddechowego na tlen powoduje redukcję cząsteczki tlenu. W efekcie do tlenu przyłączają się protony H^+ i tworzy się woda. Każdy elektron powoduje związanie jednego protonu, a przez to zmniejszenie się stężenia wolnych protonów w matriks mitochondrium.

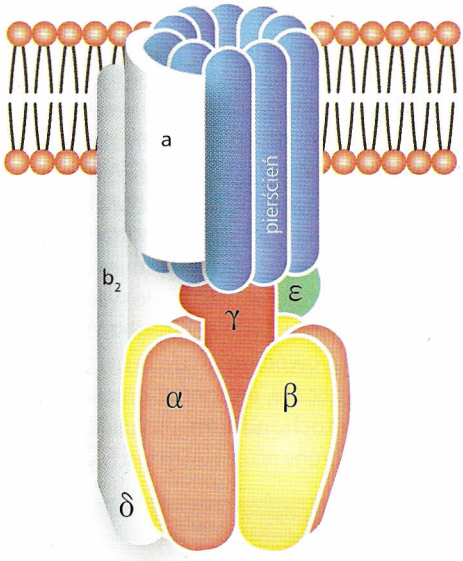
$$O_2 + 4\,e^- + 4\,H^+ \rightarrow 2\,H_2O$$

:: Ciekawostka

Gdy zbyt mało elektronów zostanie przeniesionych na tlen, dochodzi do jego niecałkowitej redukcji. Powstają wtedy wolne rodniki tlenowe (np. O_2^- lub O_2^{2-}). To bardzo reaktywne jony, które powodują w komórce duże zniszczenia – mogą uszkadzać błony komórkowe, enzymy lub DNA. Za ich neutralizację odpowiedzialne są specjalne enzymy, takie jak dysmutaza ponadtlenkowa. Negatywne działanie wolnych rodników mogą też osłabiać tak zwane antyoksydanty, do których należą witaminy E i C.

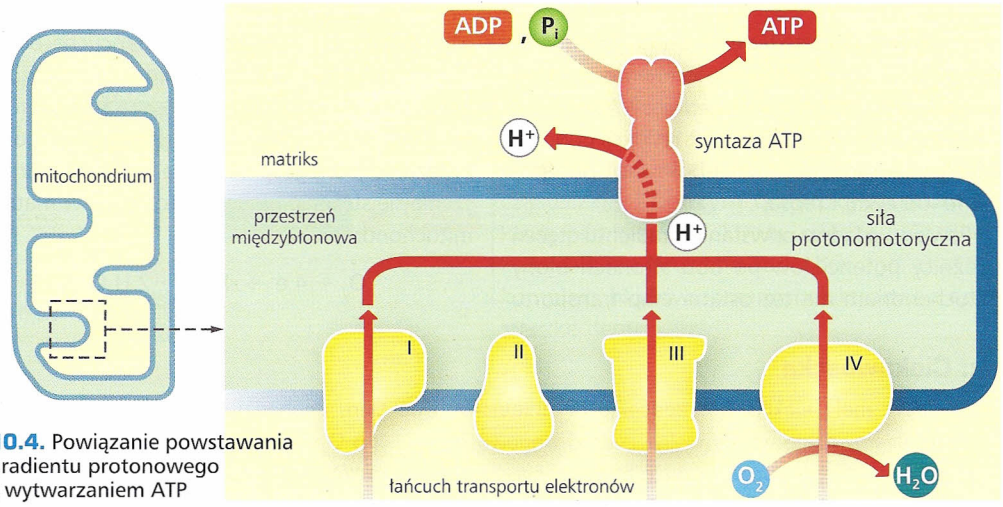
Synteza ATP

Przenoszenie protonów przez wewnętrzną błonę mitochondrium powoduje, że w **matriks mitochondrium** stężenie protonów H^+ jest niskie, a w **przestrzeni międzybłonowej** – wysokie. Ta różnica stężeń przyczynia się do powstania różnicy potencjałów. Ponieważ protony są opatrzone ładunkiem dodatnim, w przestrzeni międzybłonowej dominują ładunki dodatnie, a w matriks – ujemne. **Różnica stężeń protonów** i **różnica potencjałów** są czynnikami napędzającymi **syntezę ATP**. Jest to podstawowe założenie tak zwanej **hipotezy chemiosmotycznej Mitchella**, wyjaśniającej mechanizm **fosforylacji oksydacyjnej**. Różnica stężeń po obu stronach błony napędza skomplikowany kompleks białek nazywany **syntazą ATP** **(10.3.)**.



10.3. Budowa syntazy ATP

Podstawą tego procesu jest dążenie protonów do wyrównania stężeń i potencjałów. Wewnętrzna błona mitochondrium jest nieprzepuszczalna dla protonów, które mogą się przedostać do matriks wyłącznie kanałem przechodzącym przez syntazę ATP **(10.4.)**. Strumień protonów przez nią przepływających skutkuje ruchem obrotowym główkowatej części enzymu, sterczącej do wnętrza mitochondrium. Obroty te napędzają tworzenie ATP z ADP i wolnej reszty fosforanowej. Można powiedzieć, że kompleks syntazy ATP to miniaturowy silnik, zasilający komórkę w energię dzięki wykorzystaniu strumienia protonów.



10.4. Powiązanie powstawania gradientu protonowego z wytwarzaniem ATP

:: Ciekawostka

Bywa, że do syntezy ATP nie dochodzi, mimo że w poprzek błony mitochondrium wytworzony został gradient protonów. Przenikają one z powrotem do matriks dzięki specjalnemu białku błonowemu – termogeninie. Transport ten pomija syntazę ATP, a energia jest rozpraszana w postaci ciepła. Mechanizm ten jest podstawą działania brunatnej tkanki tłuszczowej, odpowiedzialnej za ogrzewanie organizmu.

Bilans utleniania w łańcuchu oddechowym

Sporządzenie bilansu utleniania w łańcuchu oddechowym jest znacznie trudniejsze niż dla wcześniejszych etapów oddychania. Wynika to ze skomplikowanego przebiegu syntezy ATP podczas fosforylacji oksydacyjnej. Nie zachodzą podczas niej reakcje, w trakcie których powstaje ściśle określona liczba cząsteczek ATP (jak było w fosforylacji substratowej). Ich powstawanie jest natomiast uzależnione od dwóch głównych parametrów. Pierwszym jest liczba protonów przeniesionych przez **błonę mitochondrium**, przypadających na elektron dostarczony przez NADH lub $FADH_2$. Drugim jest liczba protonów potrzebnych do zsyntetyzowania jednej cząsteczki **ATP** przez syntazę ATP. Przyjmuje się, że w wyniku fosforylacji oksydacyjnej jedna cząsteczka NADH (a właściwie przenoszone przez nią elektrony) umożliwia wytworzenie trzech cząsteczek ATP. $FADH_2$ włącza się do łańcucha oddechowego później i pomija jedną z pomp protonowych. W efekcie każdy pochodzący z niego elektron powoduje przepompowanie mniejszej liczby protonów przez błonę. Zatem elektrony przenoszone przez jedną cząsteczkę $FADH_2$ pozwalają na syntezę tylko dwóch cząsteczek ATP.

Zysk energetyczny z cząsteczek przenośników elektronów i wodoru ulegających redukcji podczas poszczególnych etapów oddychania komórkowego

	Liczba cząsteczek	Zysk ATP na cząsteczkę	Łączny zysk ATP
NADH z glikolizy	2	3	6
NADH z oksydacyjnego utleniania pirogronianu	2	3	6
NADH z cyklu Krebsa	6	3	18
$FADH_2$ z cyklu Krebsa	2	2	4
		Suma:	**34**

Podczas całego oddychania komórkowego na jedną cząsteczkę glukozy powstaje łącznie dziesięć cząsteczek **NADH** oraz dwie cząsteczki **$FADH_2$**. Z tego dwie cząsteczki NADH wytwarzane są podczas glikolizy, a dwie kolejne – podczas oksydacyjnej dekarboksylacji pirogronianu. Najwięcej, bo aż sześć cząsteczek NADH, powstaje w cyklu Krebsa. W tym procesie powstają również dwie cząsteczki $FADH_2$. Mnożąc liczbę cząsteczek przenośników wodoru i elektronów przez liczbę uzyskiwanych z nich cząsteczek ATP, możemy obliczyć łączny zysk energetyczny utleniania w łańcuchu oddechowym.

Po zsumowaniu liczby cząsteczek ATP uzyskanych z przenośników wodoru i elektronów pochodzących z różnych procesów otrzymujemy łączny zysk z utleniania w łańcuchu oddechowym. Wynosi on **34 cząsteczki ATP**. Należy do tego wyniku doliczyć ATP powstałe na drodze fosforylacji substratowej podczas glikolizy (dwie cząsteczki) i cyklu Krebsa (dwie cząsteczki GTP równoważnego ATP) **(10.5.)**. Otrzymujemy w ten sposób łączny zysk dla jednej cząsteczki glukozy w **oddychaniu tlenowym**, wynoszący **38 cząsteczek ATP**. Jak widać, zdecydowana większość ATP, bo blisko 90%, powstaje podczas utleniania w łańcuchu oddechowym. Oddychanie tlenowe jest też prawie dwudziestokrotnie bardziej efektywne w produkcji energii niż fermentacja (powstają w niej tylko dwie cząsteczki ATP)!

Łączny zapis oddychania tlenowego wygląda następująco:

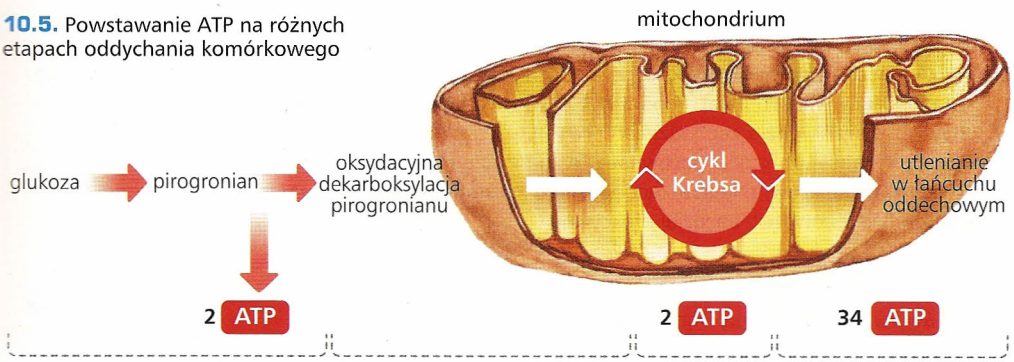
$$\text{glukoza} + 6\ O_2 + 38\ ADP + 38\ Pi \rightarrow 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 38\ ATP$$

Wytworzone cząsteczki ATP zawierają około 40% energii, która była związana w glukozie. Oznacza to bardzo wysoką sprawność oddychania komórkowego w uzyskiwaniu użytecznej energii, co wynika po części z podziału tego procesu na wiele etapów. Metody wytwarzania energii stosowane przez człowieka (np. w silnikach spalinowych) są mniej efektywne.

Dodatkowe koszty wpływające na bilans oddychania tlenowego

Powyższe wyliczenia nie uwzględniają kosztów przenoszenia NADH i ATP przez **błonę mitochondrium**. Ponieważ jest ona nieprzepuszczalna dla tych cząsteczek (tak samo jak dla protonów), potrzebne są specjalne przenośniki umożliwiające ich transport. Wiąże się to z pewnymi stratami energii, ale jest konieczne, gdyż NADH powstałe podczas **glikolizy** może zostać wykorzystane jedynie podczas utleniania w łańcuchu oddechowym. Musi więc zostać przetransportowane z cytoplazmy, gdzie powstało, do wnętrza mitochondrium, gdzie znajdują się elementy łańcucha. Z kolei ATP produkowane jest **wewnątrz mitochondrium**, a wykorzystywane głównie w innych częściach komórki. Po uwzględnieniu kosztów transportu samego tylko ATP zysk z jednej cząsteczki NADH wynosi 2,5 cząsteczki ATP, a z cząsteczki $FADH_2$ – jedynie 1,5 cząsteczki ATP. Transport NADH powstałego w glikolizie do mitochondrium jest jeszcze bardziej kosztowny. Taka cząsteczka – po uwzględnieniu transportu zarówno NADH, jak i ATP – dostarcza tylko 1,5 cząsteczki ATP. To dokładnie tyle samo, ile dostarcza $FADH_2$ powstałe w mitochndrium. Wyjątek od tej reguły występuje tylko w wątrobie i sercu, w których działają bardziej efektywne metody transportu przez błonę mitochondrium. Dzięki temu w wątrobie i sercu nie występują straty energii przy transporcie NADH.

10.5. Powstawanie ATP na różnych etapach oddychania komórkowego



Zysk z utleniania w łańcuchu oddechowym z uwzględnieniem wszystkich kosztów transportu przenośników przez błonę mitochondrium			
	Liczba cząsteczek	Zysk ATP na cząsteczkę	Łączny zysk ATP
NADH z glikolizy	2	1,5	3
NADH z oksydacyjnego utleniania pirogronianu	2	2,5	5
NADH z cyklu Krebsa	6	2,5	15
$FADH_2$ z cyklu Krebsa	2	1,5	3
		Suma:	**26**

Po ponownym obliczeniu bilansu oddychania tlenowego (z uwzględnieniem wszystkich kosztów) okazuje się, że zysk z utleniania w łańcuchu oddechowym jest znacznie niższy i wynosi tylko 26 cząsteczek ATP. Nieco wyższy jest jedynie w przypadku serca i wątroby. Dzięki sprawniejszemu mechanizmowi transportu przez błonę mitochondrium, na każdą cząsteczkę NADH powstałą w glikolizie powstaje o jedną cząsteczkę ATP więcej. Zatem łączny bilans utleniania w łańcuchu oddechowym jest dla serca i wątroby o dwie cząsteczki wyższy niż dla innych tkanek i wynosi 28 cząsteczek ATP. Po uwzględnieniu fosforylacji substratowej zachodzącej podczas glikolizy i cyklu Krebsa uzyskujemy liczbę cząsteczek ATP wytworzonych podczas całego oddychania komórkowego. Z jednej cząsteczki glukozy powstaje 30 cząsteczek ATP (lub 32 cząsteczki w przypadku serca i wątroby), co odpowiada rzeczywistym zyskom komórki. Zwykle jednak używa się wartości uproszczonych, nieuwzględniających kosztów transportu (8 cząsteczek ATP), czyli 38 cząsteczek ATP.

PODSUMOWANIE

- Podczas utleniania w łańcuchu oddechowym elektrony z NADH i $FADH_2$ są wykorzystywane do tworzenia różnicy stężeń protonów H^+ po obu stronach wewnętrznej błony mitochondrium.
- Za transport elektronów i przenoszenie protonów odpowiedzialne są cztery duże kompleksy białek związane z wewnętrzną błoną mitochondrium. Tworzą one właściwy łańcuch oddechowy.
- Hipoteza chemiosmotyczna Mitchella wyjaśnia mechanizm fosforylacji oksydacyjnej.
- Utlenianie w łańcuchu oddechowym to etap, podczas którego wytworzona zostaje większość (34 cząsteczki) ATP uzyskanego w całym oddychaniu tlenowym.
- Bilans całego oddychania, uwzględniający fosforylację substratową zachodzącą podczas glikolizy i cyklu Krebsa, to 38 cząsteczek ATP.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, w jaki sposób powstaje różnica stężeń protonów H^+ między matriks a przestrzenią międzybłonową.
2. Wyjaśnij, jaką rolę w utlenianiu w łańcuchu oddechowym odgrywa tlen.
3. Wymień etap oddychania tlenowego, podczas którego uzyskuje się najwięcej zredukowanych przenośników wodoru i elektronów wykorzystywanych w trakcie utleniania w łańcuchu oddechowym. Określ, gdzie zachodzi ten proces.
4. Sporządź tabelę, w której porównasz fermentację i oddychanie tlenowe pod względem substratów, produktów, miejsca zachodzenia i zysku energetycznego. Określ, który z porównywanych procesów jest bardziej efektywny.

W INTERNECIE

- http://www.biotechnolog.pl/molekula-6.htm

11. Metabolizm kwasów tłuszczowych

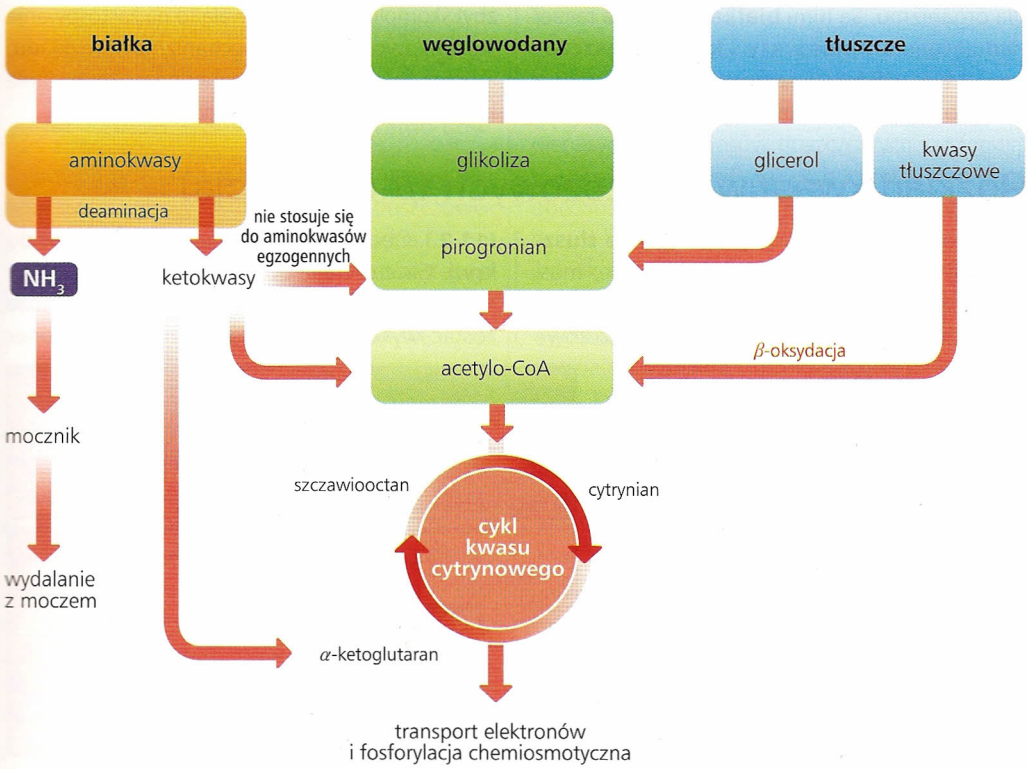
Komórki mogą wykorzystywać jako źródło **energii** wiele różnorodnych substratów. Dostarczają one różną ilość energii i są metabolizowane w odmienny sposób, jednak wszystkie szlaki metaboliczne, w których związki te ulegają przemianom, zbiegają się w cyklu Krebsa.

Podstawowe źródła energii w komórce

Dotychczasowa analiza produkcji energii w komórce nieprzypadkowo dotyczyła utleniania glukozy. **Węglowodany** wymagają bowiem stosunkowo niewielu przygotowań przed ich wykorzystaniem jako źródła energii. W większości przypadków do rozpoczęcia glikolizy konieczne jest jedynie rozbicie **polisacharydów** na **cukry proste**. Glukoza jest najczęstszym z nich, przede wszystkim jako jedyny składnik skrobi i glikogenu. Razem z galaktozą i fruktozą buduje też odpowiednio laktozę i sacharozę, czyli dwa popularne **disacharydy**. Może również być wykorzystana przez niektóre organizmy jako monomer tworzący celulozę. Najważniejsze jest jednak to, że glukoza powstaje jako końcowy produkt fotosyntezy.

Nie dziwi zatem fakt, że metabolizm wszystkich organizmów żywych jest bardzo dobrze przystosowany do wykorzystania **glukozy** jako podstawowego źródła energii. Dla niektórych ludzkich organów glukoza jest nim niemal wy-

? Na podstawie ilustracji i wiadomości z rozdziału 8. określ, czy któryś z elementów budujących tłuszcze może zostać wykorzystany w glukoneogenezie.



11.1. Powiązanie metabolizmu węglowodanów, kwasów tłuszczowych i aminokwasów

łącznie – najlepszym tego przykładem jest **mózg**. Można śmiało stwierdzić, że prawie cała energia wykorzystana przez mózg do zrozumienia niniejszego rozdziału pochodzi właśnie z utleniania glukozy. Zachodzi ono w neuronach i, podobnie jak w innych komórkach, obejmuje wszystkie etapy oddychania komórkowego – od glikolizy aż po utlenianie w łańcuchu oddechowym (uzyskana w jego wyniku energia jest następnie wykorzystywana np. do przewodzenia impulsów nerwowych). **Mięśnie** także wykorzystują do wykonywania skurczów energię pochodzącą z utleniania glukozy. Jest to szczególnie widoczne podczas intensywnego wysiłku, gdy w trakcie zachodzącej wtedy fermentacji mleczanowej glukoza stanowi w zasadzie jedyne źródło energii.

Pomimo swoich zalet węglowodany nie są jedynymi substancjami mogącymi dostarczać energię. Właściwie każdy związek organiczny może zostać przekształcony w sposób pozwalający na włączenie go do glikolizy lub do cyklu Krebsa. Dwie grupy związków mają jednak największe znaczenie i wspólnie z węglowodanami są traktowane jako podstawowe źródła energii dla organizmu. Są nimi **białka** i **lipidy**, a raczej budujące je **aminokwasy** i **kwasy tłuszczowe** (11.1.). Poniżej szczegółowo omówiono metabolizm kwasów tłuszczowych (przemianom aminokwasów poświęcony jest następny rozdział).

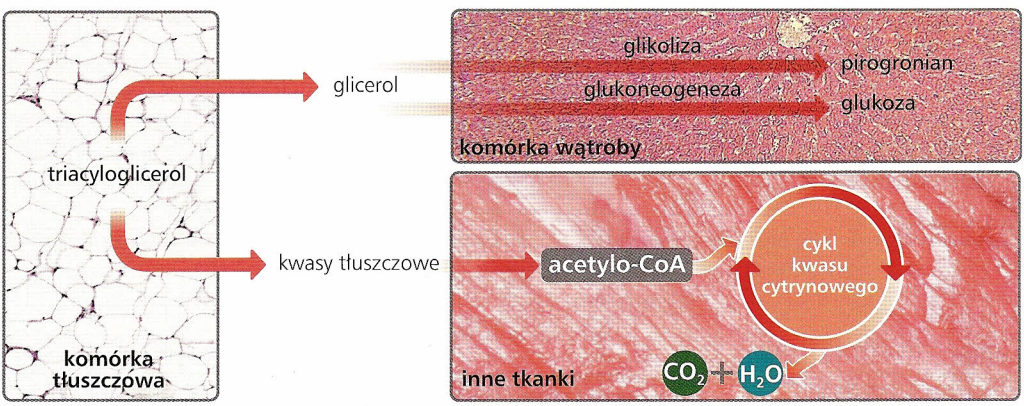
Lipidy jako źródło energii

Lipidy są podstawowymi substancjami zapasowymi w organizmach zwierząt. Wynika to przede wszystkim z dużej wartości energetycznej tych związków. Całkowite utlenienie jednego grama kwasów tłuszczowych dostarcza 38 KJ (9 kcal) energii, czyli ponad dwukrotnie więcej niż gram węglowodanów lub białek, które dostarczają 17 KJ (4 kcal). Przyczyną tak wysokiej wartości kalorycznej jest bardzo niskie utlenienie kwasów tłuszczowych – zawierają one prawie wyłącznie węgiel i wodór. Wykorzystanie lipidów jako substancji zapasowej pozwala więc na zmniejszenie względnej wagi rezerw energatycznych.

Kolejną zaletą lipidów jest ich stosunkowo prosta budowa. **Triglicerydy**, czyli lipidy najczęściej wykorzystywane jako źródło energii, to połączenie niewielkiej cząsteczki **glicerolu** z trzema **kwasami tłuszczowymi**. Nawet jeśli łańcuchy węglowe tworzące te kwasy są znacznej długości (co często się zdarza), cząsteczka triglicerydu wciąż nie jest zbyt skomplikowana. Pozwala to na zastosowanie stosunkowo prostych mechanizmów rozkładu, a przez to – na szybkie i sprawne wykorzystanie kwasów tłuszczowych w razie braku energii.

Rozkład kwasów tłuszczowych (β-oksydacja)

Triglicerydy są magazynowane w **tkance tłuszczowej**. Aby mogły zostać wykorzystane, musi najpierw dojść do rozdzielenia cząsteczki triglicerydu na glicerol i wolne kwasy tłuszczowe (11.2.). Oba związki są następnie wydzielane do **krwi**. Glicerol trafia do **wątroby**, gdzie podlega niewielkim przekształceniom, po których może zostać wykorzystany w glikolizie lub glukone-



11.2. Schemat wykorzystania triglicerydów podczas oddychania komórkowego

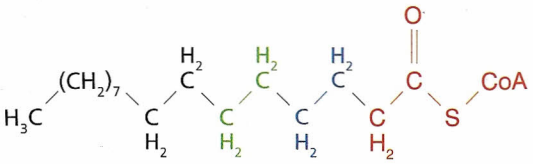
ogenezie. Kwasy tłuszczowe są transportowane bezpośrednio do tkanek, gdzie – po pobraniu przez komórki potrzebujące energii – ulegają dalszym przemianom w **matriks mitochondriów**. Aby przedostać się przez błonę mitochondrium, muszą jednak wcześniej zostać aktywowane. Polega to na dołączeniu **koenzymu A** do cząsteczki kwasu tłuszczowego **(11.3.)**. Reakcja ta zużywa energię pochodzącą z ATP.

W **mitochondrium** kwas tłuszczowy połączony z koenzymem A podlega stopniowemu rozkładowi. Odbywa się to w cyklach, z których każdy składa się kilku reakcji. W ich trakcie cząsteczka kwasu tłuszczowego ulega utlenianiu. Towarzyszy temu redukcja jednej cząsteczki FAD do $FADH_2$ oraz jednej NAD^+ do NADH. Ostatnią reakcją jest odcięcie **koenzymu A** z dwuwęglowym fragmentem łańcucha kwasu tłuszczowego. Powstaje w ten sposób **acetylo-CoA**. Równocześnie w miejscu przecięcia łańcucha przyłączany jest kolejny koenzym A. W efekcie otrzymujemy ponownie cząsteczkę kwasu tłuszczowego połączoną z koenzymem A, z tym, że jest ona krótsza o dwa atomy węgla. Zbiorczo jeden cykl można zapisać następująco:

kwas tłuszczowy (n atomów węgla) związany z CoA + NAD^+ + FAD + CoA + H_2O →
kwas tłuszczowy (n-2 atomów węgla) związany z CoA + NADH + H^+ + $FADH_2$ + acetylo-CoA

Jest on powtarzany tak długo, aż pozostanie tylko dwuwęglowy fragment kwasu tłuszczowego, który nie wymaga już dalszego cięcia.

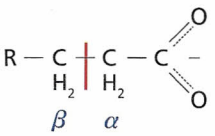
Cięcie łańcucha kwasu tłuszczowego następuje zawsze między pierwszym a drugim atomem węgla od strony grupy karboksylowej (ale nie licząc węgla należącego do samej grupy). Jest to atom **węgla** opisywany symbolem β (beta, druga litera alfabetu greckiego) **(11.4.)**. Z tego powodu opisany wyżej proces rozkładu kwasu tłuszczowego na cząsteczki acetylo-CoA nazywa się **β-oksydacją**. Jak widać, nie dostarcza on bezpośrednio ani jednej cząsteczki ATP. Powstaje jednak po jednej cząsteczce **$FADH_2$** i **NADH** na każdy cykl β-oksydacji. Kwas palmitynowy, który składa się z 16 atomów węgla, podlega podziałowi siedem razy (po ostatnim podziale powstają dwie identyczne dwuwęglowe cząsteczki acetylo-CoA). Zatem w wyniku β-oksydacji tego kwasu powstaje siedem cząsteczek $FADH_2$ i siedem cząsteczek



11.3. Kwas palmitynowy połączony z koenzymem A; kolorami zaznaczono fragmenty, z których podczas pierwszych trzech cykli β-oksydacji powstaną trzy cząsteczki acetylo-CoA.

NADH. Dodatkowo utworzonych zostaje osiem cząsteczek **acetylo-CoA**, które są następnie wykorzystywane w **cyklu Krebsa**. Zatem łącznie z jednej cząsteczki kwasu palmitynowego powstaje 31 cząsteczek NADH. Z tego siedem pochodzi z β-oksydacji, a 24 – z cyklu Krebsa (w którym każda z ośmiu cząsteczek acetylo-CoA daje trzy cząsteczki NADH). Poza tym powstaje 15 cząsteczek $FADH_2$. Z tego siedem pochodzi z β-oksydacji i osiem z cyklu Krebsa (w którym każda czasteczka acetylo-CoA daje jedną cząsteczkę $FADH_2$). Stosując takie same zasady przeliczania NADH i $FADH_2$ na ATP, jak w przypadku glukozy, otrzymuje się aż 123 cząsteczki ATP z jednej cząsteczki kwasu palmitynowego! Ponadto z każdej cząsteczki acetylo-CoA uzyskuje się 1 GTP bezposrednio w cyklu Krebsa (łącznie 8 GTP).

W opisany sposób przebiega utlenianie **nasyconych kwasów tłuszczowych** o parzystej liczbie atomów węgla. Natomiast w cząsteczkach nienasyconych kwasów tłuszczowych występują wiązania podwójne, których rozkład wymaga obecności dodatkowych enzymów i przeprowadzenia kolejnych reakcji. Efektem końcowym jest jednak również powstanie acetylo-CoA. Z kolei kwasy tłuszczowe o nieparzystej liczbie atomów węgla są rozkładane normalnie, ale po ostatnim podziale pozostaje, oprócz cząsteczki acetylo-CoA, koenzym A związany z trójwęglowym fragmentem łańcucha kwasu tłuszczowego. Jest on również wykorzystywany w cyklu Krebsa, ale na innym etapie niż dwuwęglowy acetylo-CoA.



11.4. Budowa cząsteczki kwasu tłuszczowego; zaznaczono atomy węgla α i β, R oznacza różnej długości łańcuchy węglowe, a czerwona linia – miejsce rozszczepienia cząsteczki podczas pierwszego cyklu β-oksydacji.

Synteza kwasów tłuszczowych

Szlak **syntezy kwasów tłuszczowych** jest w zasadzie odwróceniem β-oksydacji. Jego substratem jest **acetylo-CoA**, którego kolejne cząsteczki są stopniowo dołączane do powstającego łańcucha kwasu tłuszczowego. Energia zużyta w tym procesie pochodzi z ATP. Dołączony fragment łańcucha ulega stopniowej redukcji, czyli reakcji odwrotnej do zachodzącego w β-oksydacji utleniania. W zależności od liczby wykorzystanych cząsteczek acetylo-CoA, powstają kwasy tłuszczowe różnej długości.

Pomiędzy oboma procesami występują jednak różnice, które nie polegają na prostym odwróceniu zachodzących reakcji. Przede wszystkim synteza kwasów tłuszczowych odbywa się **w cytoplazmie** (β-oksydacja zachodziła w mitochondrium). Pozwala to na oddzielenie obu procesów i ich odrębną regulację (przeprowadzanie ich równocześnie miałoby niewiele sensu). Poza tym wodór do redukcji syntetyzowanego kwasu tłuszczowego dostarczany jest wyłącznie przez **NADPH** (na każdy dołączony acetylo-CoA zużywane są dwie cząsteczki NADPH). Jak wspominano w rozdziale 5., jest on zwykle wykorzystywany w reakcjach biosyntez zamiast NADH i $FADH_2$. W β-oksydacji powstawała jedna cząsteczka NADH i jedna cząsteczka $FADH_2$, a elektrony w $FADH_2$ mają niższą energię niż w NADPH. Jest to jeden z powodów, dla których do syntezy kwasów tłuszczowych organizm zużywa więcej energii, niż dostarcza jej β-oksydacja. Drugim jest wykorzystanie ATP do łączenia cząsteczek acetylo-CoA w łańcuch kwasu – podczas β-oksydacji ATP nie było tworzone.

Łącznie jeden cykl syntezy kwasów tłuszczowych można zapisać następująco:

kwas tłuszczowy (n atomów węgla) związany z CoA + 2 NADPH + 2 H^+ + ATP + acetylo-CoA → kwas tłuszczowy (n+2 atomów węgla) związany z CoA + 2 $NADP^+$ + ATP + CoA + H_2O

PODSUMOWANIE



- Węglowodany są podstawowym źródłem energii w komórce, jednak duże znaczenie mają również kwasy tłuszczowe i aminokwasy.
- Kwasy tłuszczowe w przeliczeniu na gram dostarczają dwukrotnie więcej energii niż węglowodany lub aminokwasy.
- Pierwszym etapem przygotowania lipidów do wykorzystania ich jako źródła energii jest rozkład na glicerol i kwasy tłuszczowe.
- Kwasy tłuszczowe są rozkładane w mitochondriach w procesie nazywanym β-oksydacją. Polega on na cyklicznym podziale kwasu tłuszczowego na dwuwęglowe fragmenty wiązane w acetylo-CoA.
- Acetylo-CoA jest następnie wykorzystywany w cyklu Krebsa tak samo, jak acetylo-CoA powstały z glukozy.
- Podczas każdego cyklu β-oksydacji powstaje po jednej dodatkowej cząsteczce NADH i $FADH_2$.
- Synteza kwasów tłuszczowych zachodzi w cytoplazmie i jest w przybliżeniu odwróceniem β-oksydacji.

ZADANIA



1. Wymień podstawowe grupy związków organicznych, które mogą być źródłem energii w oddychaniu komórkowym. Podaj, która z tych grup dostarcza najwięcej energii.
2. Oblicz, ile cząsteczek ATP powstanie podczas oddychania komórkowego, dla którego substratem jest kwas arachidowy (zawiera on 20 atomów węgla w łańcuchu).
3. Podaj, ile cząsteczek acetylo-CoA jest potrzebnych dla wytworzenia kwasu palmitynowego. Łańcuch tego kwasu składa się z 16 atomów węgla.
4. Poszukaj informacji na temat występowania nienasyconych kwasów tłuszczowych. Wyjaśnij, dlaczego wiele z nich musi być dostarczanych z pokarmem (odnieś się przy tym do przebiegu syntezy kwasów tłuszczowych).

BIBLIOGRAFIA



- Minakowski W., *Biochemia kręgowców*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

12. Metabolizm aminokwasów

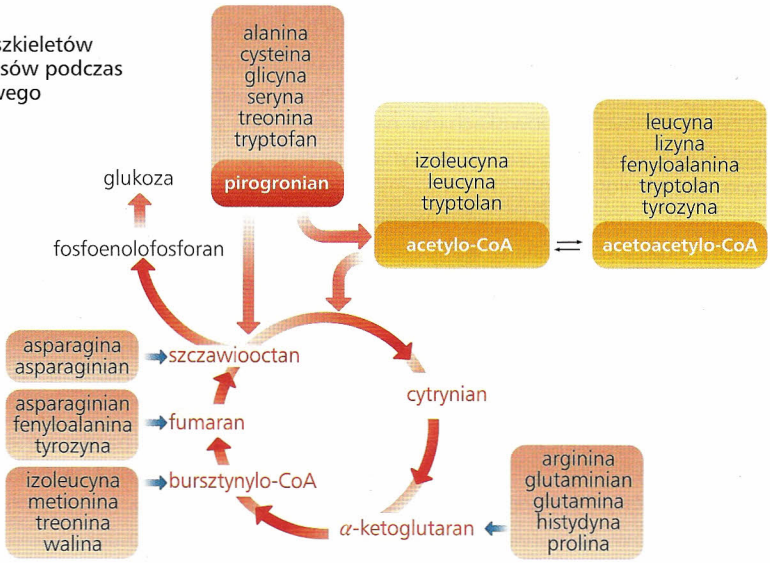
Wykorzystanie **aminokwasów** jako źródła energii jest bardziej skomplikowane niż wykorzystanie kwasów tłuszczowych i węglowodanów. Największy problem stanowi powstawanie **amoniaku** (toksycznego w większych stężeniach). W związku z tym konieczne stało się wykształcenie specjalnego mechanizmu jego usuwania.

Metabolizm aminokwasów

Aminokwasy dostarczają podobną ilość energii, co cukry proste, jednak są wykorzystywane podczas oddychania komórkowego tylko wtedy, gdy występują w nadmiarze lub gdy zabraknie innych surowców energetycznych. Nie są też magazynowane jako substancje zapasowe. Przyczyn tego stanu rzeczy jest kilka. Przede wszystkim, aminokwasy prawie zawsze są składnikami **białek**, w tym tych o specjalnych właściwościach (np. **enzymów**). Różnorodność tej grupy związków jest ogromna. Metody ich rozkładu na aminokwasy są więc bardziej skomplikowane niż rozkład znacznie mniej zróżnicowanych polisacharydów (np. skrobi na cząsteczki glukozy). Ponieważ każdy z ponad dwudziestu aminokwasów ma inną budowę i właściwości, inaczej przebiega jego metabolizm. Dlatego po rozpadzie określonego białka na aminokwasy musi działać wiele szlaków metabolicznych.

Dodatkowy problem stwarza **grupa aminowa** $-NH_2$ (czasem nawet dwie) występujaca we wszystkich aminokwasach. Musi ona zostać odłączona, zanim szkielet węglowy aminokwasu będzie mógł być wykorzystany jako źródło energii. Jednym z rozwiązań jest przeniesienie jej na inny związek organiczny, z którego może powstać nowy aminokwas. Gdy nie ma zapotrzebowania na inne aminokwasy, grupa aminowa jest odłączana w reakcji **deaminacji**. W jej wyniku powstaje pochodna **amoniaku**, czyli **jon amonowy** NH_4^+, który jest toksyczny i wymaga specjalnego traktowania (więcej na ten temat w dalszej części rozdziału).

Jak widać, przekształcanie aminokwasów w surowiec energetyczny to bardzo skomplikowany proces. Musi on być kontrolowany na poziomie organizmu, ponieważ aminokwasy mają krytyczne znaczenie jako składnik białek budulcowych i enzymatycznych. Swobodne wykorzystywanie aminokwasów jako źródła energii może powodować, że w jednych tkankach będzie występować ich nadmiar, a w innych –



12.1. Wykorzystanie szkieletów węglowych aminokwasów podczas oddychania komórkowego

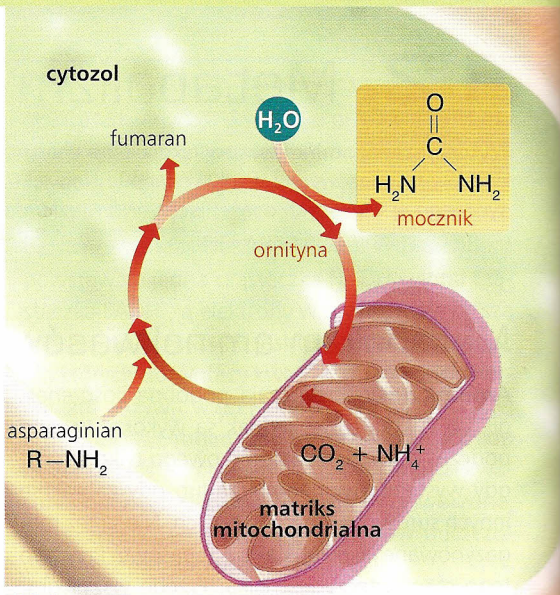
niedobór. Dlatego ich przekształcenia odbywają się głównie w **wątrobie**, która odgrywa rolę centralnego punktu przetwarzania związków chemicznych. Tu szkielety węglowe aminokwasów są wykorzystywane jako źródło energii lub też przetwarzane w glukozę, rozprowadzaną później do innych narządów. Poza wątrobą jedynie **mięśnie** wykorzystują aminokwasy jako surowiec energetyczny. Dochodzi do tego, gdy w wyniku bardzo intensywnych ćwiczeń (lub głodu) w mięśniach zaczyna brakować energii. Nie zachodzą w nich jednak wszystkie przemiany konieczne do zneutralizowania amoniaku. Jest on w związku z tym transportowany do wątroby.

Powstałe w wyniku deaminacji szkielety węglowe aminokwasów mogą być wykorzystywane na różnych etapach **oddychania komórkowego** (12.1.). Zależy to od ich budowy. Aminokwasy, z których po usunięciu grupy aminowej powstaje pirogronian (jak np. alanina), mogą brać udział już w końcowym etapie glikolizy, a nawet stanowić substrat **glukoneogenezy**. Część aminokwasów może zostać przekształcona do postaci **acetylo-CoA** i wprowadzona do **cyklu Krebsa** tą samą drogą, co węglowodany i kwasy tłuszczowe. Pozostałe mogą dołączać na dalszych etapach cyklu Krebsa (np. jako szczawiooctan, fumaran lub α-ketoglutaran).

Cykl mocznikowy

Amoniak w większych stężeniach jest toksyczny. Nie stanowi to problemu dla zwierząt żyjących w wodach słodkich – mogą go one wydalać w bardzo rozcieńczonym **moczu**. Jednak zwierzęta żyjące w innych środowiskach (np. na lądzie) muszą usuwać amoniak w sposób niewymagający zużycia dużych ilości wody. Rozwiązaniem jest przekształcanie amoniaku w nietoksyczny mocznik, który może być wydalany w moczu o większym stężeniu. Z dwóch cząsteczek **amoniaku** powstaje jedna cząsteczka **mocznika**. Jego synteza zachodzi u ssaków jedynie w **komórkach wątroby**, podczas tak zwanego **cyklu mocznikowego** (12.2.). Często używana jest też nazwa **cykl ornitynowy**, od jednego z jego metabolitów pośrednich.

Cykl mocznikowy rozpoczyna się w **matriks mitochondriów** komórek wątroby. Podczas



12.2. Cykl mocznikowy

zachodzących tu reakcji **amoniak** jest łączony (kosztem energii z ATP) z **dwutlenkiem węgla**. Powstały związek jest przyłączany do specjalnego aminokwasu – **ornityny**. Produkt tej reakcji jest przenoszony do cytoplazmy komórki. Tu przyłączany jest do niego kolejny aminokwas – **asparaginian**. Również ten proces jest bardzo energochłonny. Powstały związek ulega następnie rozpadowi z wydzieleniem **fumaranu**. Z pozostałej części odłączana jest gotowa cząsteczka **mocznika** oraz regenerowana jest ornityna. Wraca ona następnie do mitochondrium. W związku z tym, że ornityna jest zarówno zużywana, jak i tworzona w cyklu mocznikowym, nie uwzględnia się jej wśród substratów i produktów cyklu.

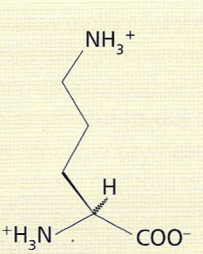
Łączna reakcja cyklu mocznikowego przedstawia się następująco:

$$CO_2 + NH_4^+ + \text{asparaginian} + 2\ H_2O + 3\ ATP \rightarrow \text{mocznik} + \text{fumaran} + 2\ ADP + AMP + 4\ Pi$$

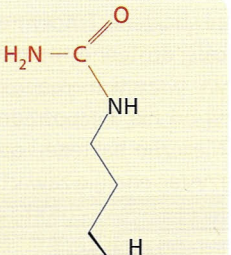
Podczas syntezy mocznika wykorzystywane są tylko trzy cząsteczki ATP, ale w jednej z nich dochodzi do hydrolizy obu wiązań wysokoenergetycznych. Zatem łączny koszt tego procesu jest równy wykorzystaniu czterech cząsteczek ATP. Oznacza to, że synteza mocznika jest reakcją bardzo energochłonną. Dlatego przeprowadzają ją tylko te zwierzęta, które w związku z oszczędzaniem wody nie mogą wydalać amoniaku.

:: Ciekawostka

Ornityna i cytrulina to aminokwasy niebiałkowe. Oznacza to, że nie są one wbudowywane do białek podczas ich syntezy. W organizmie człowieka aminokwasy te występują głównie jako metabolity pośrednie cyklu mocznikowego. Cytrulina powstaje w nim w wyniku dołączenia amoniaku i dwutlenku węgla do ornityny. Poza tym może powstawać w już utworzonych białkach na skutek przemian innych aminokwasów.



ornityna



cytrulina

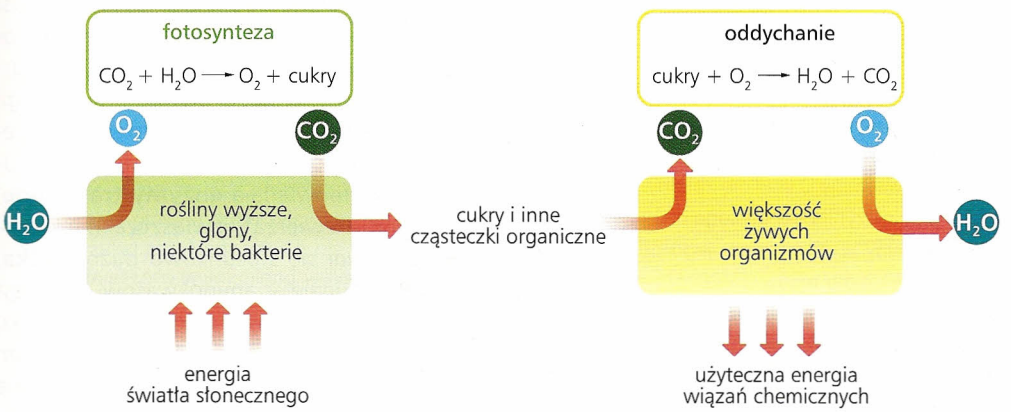
Uniwersalność szlaków metabolicznych

Jedną z najważniejszych cech szlaków metabolicznych jest ich uniwersalność. W związku ze wspólnym pochodzeniem wszystkie organizmy są zbudowane z takich samych cząsteczek i w podobny sposób je syntetyzują i rozkładają. Większość omówionych dotychczas szlaków metabolicznych to procesy o podstawowym znaczeniu dla komórki. Dotyczą najważniejszych wchodzących w jej skład cząsteczek, czyli węglowodanów, białek i lipidów. Zwykle im bardziej krytyczne znaczenie dla funkcjonowania komórki ma jakiś szlak metaboliczny, tym mniejsze zmiany zachodzą w nim w toku ewolucji. W efekcie większe różnice występują w budowie organizmów niż w odpowiedzialnych za ich działanie szlakach metabolicznych.

Przykładem dużego konserwatyzmu szlaków metabolicznych jest fermentacja mleczanowa. Ma ona taki sam przebieg w mięśniach człowieka i u bakterii odpowiedzialnych za kwaśnienie mleka. Kolejne etapy oddychania tlenowego u różnych gatunków organizmów również przebiegają w podobny sposób. Dotyczy to zwłaszcza mechanizmu utleniania w łańcuchu oddechowym. Dowodzi tego przykład **cytochromu c**, który od momentu powstania (ok. 1,5 mld lat temu) zmienił się na tyle mało, że jego cząsteczka pochodząca z pszenicy może przeprowadzać reakcje z elementami łańcucha oddechowego mitochondriów człowieka.

Specyficzne cechy metabolizmu roślin i zwierząt

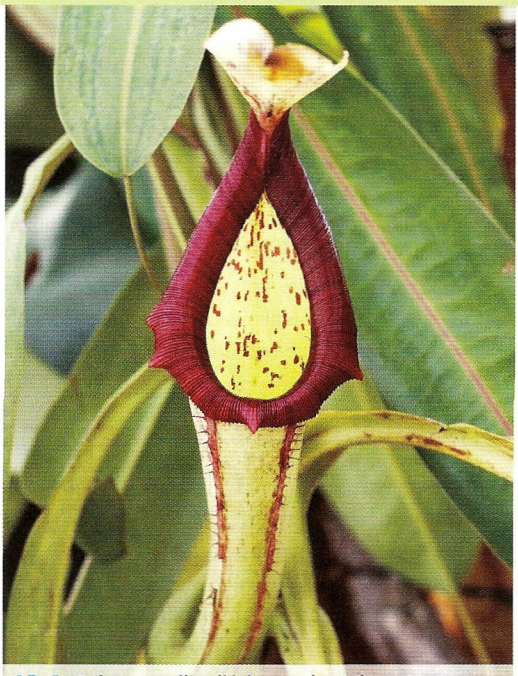
Jednym z podstawowych kryteriów podziału organizmów żywych jest to, które uwzględnia pochodzenie związków organicznych przez nie wykorzystywanych. Na tej podstawie wyróżnia się organizmy **heterotroficzne** i **autotroficzne**. O zaliczeniu do jednej z tych grup decyduje zdolność (lub jej brak) do wiązania dwutlenku węgla w związkach organicznych z wykorzystaniem energii pochodzącej ze źródeł nieorganicznych. Najpowszechniej w reakcjach biosyntez wykorzystywana jest oczywiście energia światła słonecznego. Zużywają ją podczas fotosyntezy tak różnorodne grupy, jak rośliny lądowe, glony, sini-



12.3. Powiązanie fotosyntezy i oddychania

ce i bakterie. Fotosynteza jest źródłem w zasadzie całej dostępnej materii organicznej, dlatego prawie wszystkie organizmy, w tym heterotroficzne, są od niej bezpośrednio lub pośrednio zależne. Nieliczne bakterie i archeany są w stanie wykorzystać energię zawartą w prostych substancjach nieorganicznych (np. dzięki utlenianiu siarki lub żelaza) – proces ten nazywamy **chemosyntezą**, jednak jego znaczenie dla produkcji materii organicznej jest niewielkie. Takie unikatowe szlaki metaboliczne pozwalają określonym grupom organizmów lepiej przystosować się do konkretnego trybu życia.

Do pewnego stopnia oddychanie komórkowe i fotosynteza są swoimi lustrzanymi odbiciami (12.3.). Oba procesy zachodzą w specjalnych organellach – odpowiednio **mitochondriach** lub **chloroplastach**. Organizmy heterotroficzne nie musiały jednak wykształcić skomplikowanych szlaków syntez związków organicznych, ponieważ – co jest znacznie prostsze – pobierają te związki z pokarmem (dotyczy to np. **witamin**). Natomiast efektywne prowadzenie, a nawet sama zdolność do fotosyntezy wymaga od rośliny poniesienia dużych kosztów. Musi ona bowiem wytworzyć odpowiednie enzymy oraz związki i struktury przechwytujące i przekształcające energię świetlną w energię wiązań chemicznych. Rośliny i duża część bakterii pobierają z otoczenia jedynie proste związki nieorganiczne, z których samodzielnie syntetyzują wszystkie potrzebne im do życia substancje (w tym witaminy). Podstawą złożonego metabolizmu roślin są **węglowodany**. Tylko one są produkowane w trakcie fotosyntezy, a z nich dopiero powstają inne związki organiczne. Kilka najistotniejszych szlaków metabolicznych przeprowadzanych przez rośliny zostanie omówionych w następnych rozdziałach. Będą to jednak wybrane procesy, najważniejsze dla zrozumienia roli roślin jako pierwotnych producentów materii organicznej. Przebieg fotosyntezy jest bowiem o wiele bardziej złożony niż przebieg oddychania komórkowego.



12.4. Dzbanecznik – liście przekształcone w pułapki na owady ułatwiają roślinie uzupełnienie niedoborów azotu.

Nie należy jednak zapominać, że **odżywianie heterotroficzne** również stanowi duże wyzwanie dla metabolizmu. Zwierzę musi przede wszystkim zdobyć pokarm, w czym pomocna okazuje się zdolność **mięśni** do skurczów, możliwa dzięki wykorzystaniu energii z ATP. Pokarm po zjedzeniu musi zostać przekształcony w formę przyswajalną dla komórek, za co odpowiadają **enzymy trawienne**. W pokarmie zwierząt, zwłaszcza mięsożernych, znajduje się stosunkowo dużo **białka**, a co za tym idzie – aminokwasów. Gdy jest ich zbyt dużo, zostają rozłożone, w wyniku czego powstaje amoniak. W związku z tym **cykl mocznikowy** u zwierząt jest szczególnie ważny, zwłaszcza jeśli muszą one równocze-

:: Ciekawostka

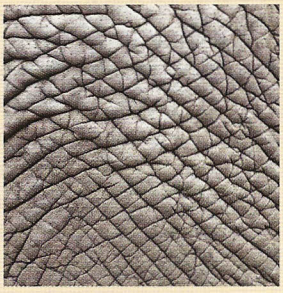
Większość zwierząt potrafi sama wyprodukować witaminę C, jednak są i takie, które utraciły tę zdolność (np. małpy, świnki morskie i niektóre nietoperze, głównie owocożerne). W tej ostatniej grupie jest też człowiek, dla którego szlak metaboliczny prowadzący do syntezy witaminy C stał się zbędny. Prawdopodobnie przyczyniła się do tego duża zawartość tej witaminy w pożywieniu jego przodków (jej brak nie miał dla nich większych negatywnych skutków). Dla ludzi żyjących współcześnie oznacza to jednak konieczność dostarczania organizmowi odpowiedniej ilości witaminy C.

śnie oszczędzać wodę. Rośliny wykorzystują do syntezy aminokwasów nieorganiczne związki azotu pobierane z gleby, których zwykle nie jest zbyt wiele. Ich brak musi zostać uzupełniony – albo dzięki nawozom zastosowanym w uprawie, albo w inny sposób **(12.4.)**. W związku z brakami azotu rośliny muszą prowadzić bardzo oszczędną gospodarkę aminokwasami, nie mają zatem problemu z nadmiarem amoniaku powstającego z tych związków.

PODZIAŁ OMÓWIONYCH SZLAKÓW METABOLICZNYCH W ZALEŻNOŚCI OD ICH WYSTĘPOWANIA U ROŚLIN I ZWIERZĄT

Szlaki metaboliczne wspólne dla roślin i zwierząt

- glikoliza
- fermentacja
- glukoneogeneza
- oksydakcyjna dekarboksylacja pirogronianu
- cykl Krebsa
- utlenianie w łańcuchu oddechowym
- β-oksydacja
- synteza kwasów tłuszczowych
- cykl mocznikowy



Szlaki metaboliczne występujące tylko u roślin

- faza jasna fotosyntezy
- faza ciemna fotosyntezy (cykl Calvina)



PODSUMOWANIE

- Aminokwasy dostarczają równie dużo energii, co węglowodany, jednak ich wykorzystanie jest utrudnione w związku z ich skomplikowaną budową.
- Podczas rozkładu aminokwasów dochodzi do deaminacji. W jej wyniku uwalniane są szkielety węglowe aminokwasów, które mogą zostać wykorzystane w produkcji energii, oraz toksyczny amoniak.
- Amoniak może być wydalany lub przekształcany w nietoksyczny mocznik. Jedna cząsteczka mocznika powstaje z dwóch cząsteczek amoniaku i jednej cząsteczki dwutlenku węgla.
- Za syntezę mocznika z amoniaku odpowiada cykl mocznikowy. Jest to proces zużywający stosunkowo dużo energii.
- Większość szlaków metabolicznych jest wspólna dla wszystkich organizmów. Do wyjątków należy fotosynteza, będąca jednym z najbardziej skomplikowanych procesów zachodzących w komórce.

ZADANIA

1. Podaj główne powody, dla których wykorzystanie aminokwasów jako surowca energetycznego jest trudniejsze niż w przypadku węglowodanów i kwasów tłuszczowych.
2. Opisz, w jaki sposób dochodzi do przekształcenia w mocznik amoniaku powstałego z rozkładu aminokwasów w mięśniach.
3. Wyjaśnij, na czym polega główna wada produkcji mocznika przez zwierzęta. Uzasadnij, dlaczego mimo to jest on produkowany i wydalany.
4. Wymień główne substraty i produkty cyklu mocznikowego.
5. Wyszukaj przykłady innych niż fotosynteza szlaków metabolicznych, które występują tylko u roślin (niektóre wymieniono w podręczniku). Wyjaśnij, jaka jest ich funkcja w metabolizmie rośliny.

BIBLIOGRAFIA

- Konieczny L., Roterman I., Spólnik P., *Biologia systemów. Strategia działania organizmu żywego*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.

13. Wprowadzenie do fotosyntezy

Liście większości **roślin** są zielone – dotyczy to nawet tak daleko spokrewnionych grup, jak mchy i rośliny okrytozalążkowe. Jeśli jakieś gatunki nie mają typowych liści (jak kaktusy), wówczas inne ich części wystawione na działanie promieni słonecznych są tego koloru. Wiele grup glonów również jest zielonych, ale u niektórych (tzn. brunatnic, okrzemek i krasnorostów) barwa ta nie występuje. Na to, jaki odcień zieleni mają liście, wpływa rodzaj barwnika fotosyntetycznego obecnego w komórkach. Zależy on od wielu różnych czynników (nie tylko gatunku i wieku rośliny, lecz także np. środowiska życia).

Ogólna charakterystyka fotosyntezy

Chlorofil, odpowiedzialny za zieloną barwę roślin, zawarty jest w **tylakoidach chloroplastów**. To system silnie pofałdowanych błon, analogiczny do grzebieni mitochondrialnych. Pofałdowanie zwiększa ilość barwnika w chloroplastach, a co za tym idzie – w poszczególnych komórkach i całej roślinie. Ma to bardzo duże znaczenie, ponieważ chlorofil jest kluczowym elementem procesu **fotosyntezy**. Dzięki niej wytwarzana jest większość **związków organicznych** wykorzystywanych przez żywe organizmy, proces ten odgrywa więc pierwszoplanową rolę w funkcjonowaniu życia na Ziemi.

Organizmy, które są w stanie syntetyzować związki organiczne z nieorganicznych, to **autotrofy** (organizmy samożywne). Wyróżnia się wśród nich dwie grupy. Pierwszą – i prawdopodobnie starszą – są **chemoautotrofy**, które do syntezy związków organicznych wykorzystują energię uzyskaną z utleniania **prostych związków chemicznych** lub **jonów**. Procesy te mają duże znaczenie dla obiegu pierwiastków w przyrodzie, jednak ich rola w syntezie materii organicznej jest niewielka (zostaną one omówione w rodziale 17.).

Drugą grupą organizmów autotroficznych są **fotoautotrofy**, które do syntezy związków organicznych wykorzystują światło słoneczne, a więc przeprowadzają fotosyntezę. Proces fotosyntezy można ogólnie zapisać w postaci równania:

$$6\,CO_2 + 12\,H_2O + 2867\ KJ\ (\text{energia świetlna}) \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2 + 6\,H_2O$$

Najważniejszym produktem fotosyntezy przeprowadzanej przez rośliny są **cukry** (np. zapisana w równaniu glukoza), natomiast jako produkt uboczny wydziela się tlen. Spośród substratów dwutlenek węgla jest w całości wbudowywany do cukrów, a woda staje się źródłem protonów H^+. Zawarty w niej tlen jest uwalniany do atmosfery. Nie wszystkie organizmy fotoautotroficzne wykorzystują wodę jako źródło wodoru. Na przykład **bakterie purpurowe** korzystają z **siarkowodoru**, a więc dla nich zapis fotosyntezy jest następujący:

$$6\,CO_2 + 12\,H_2S + 2867\ KJ\ (\text{energia świetlna}) \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 12\,S + 6\,H_2O$$

Jeśli uwzględnić różne możliwe źródła wodoru, równanie fotosyntezy będzie miało formę:

$$6\,CO_2 + 12\,H_2A + 2867\ KJ\ (\text{energia świetlna}) \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 12\,A + 6\,H_2O,$$

gdzie H_2A to dawca wodoru.

Proces fotosyntezy jest znacznie bardziej skomplikowany, niż sugeruje to powyższy zapis. Składa się z kilku etapów, z których pierwszym jest **faza jasna**. Jak wskazuje nazwa, faza ta zależy od światła i ustaje natychmiast, gdy tylko go zabraknie. Prowadzi ona do związania energii świetlnej w postaci **ATP** i zredukowania przenośnika wodoru – **NADPH**. Stanowią one tak zwaną **siłę asymilacyjną**.

Siła asymilacyjna jest następnie wykorzystywana w trakcie **fazy ciemnej fotosyntezy**. Ponieważ ta faza wykorzystuje energię związków chemicznych, nie jest bezpośrednio zależna od światła. Może więc zachodzić dopóty, dopóki dostępne są związki wytworzone podczas fazy jasnej, a zatem nawet w całkowitej ciemności (stąd nazwa faza ciemna). Jej podstawowym elementem jest ciąg reakcji określany jako **cykl Calvina**. Produktami tej fazy są cukry trójwęglo-

we (triozy), wykorzystywane następnie do syntezy heksoz (w tym glukozy) oraz innych związków organicznych.

Barwniki fotosyntetyczne

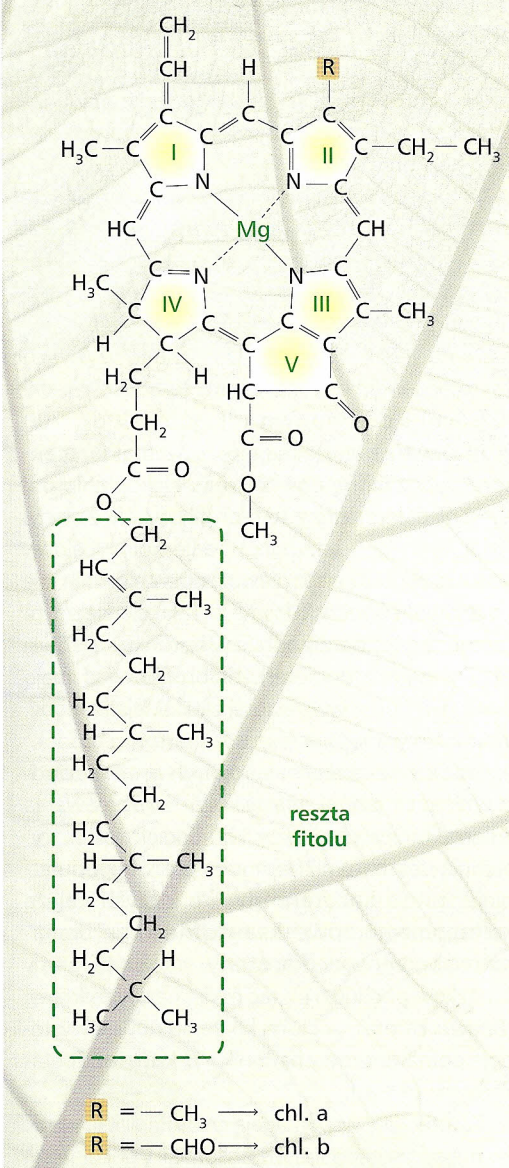
Integralną częścią fazy jasnej fotosyntezy jest proces pochłaniania energii świetlnej przez roślinę (zostanie on szczegółowo omówiony w następnym rozdziale). Kluczową rolę w tym procesie odgrywają **barwniki fotosyntetyczne** (**asymilacyjne**), co umożliwiają im ich charakterystyczne właściwości.

Najbardziej podstawowymi barwnikami asymilacyjnymi są **chlorofile**. Są to duże związki chemiczne, zawierające około 55 atomów węgla i zbudowane z dwóch zasadniczych części (**13.1.**). Jedną z nich jest **układ porfirynowy**, podobny do hemu zawartego w hemoglobinie, w którym zamiast żelaza występuje magnez. W chlorofilu wiązania podwójne są ułożone inaczej niż w hemie i w wyniku tego – bardzo niestabilne. To sprawia, że chlorofil jest łatwo wzbudzany przez światło i może przekazywać jego energię dalej.

Drugim istotnym elementem budowy chlorofilu jest **fitol**. To alkohol zbudowany z 20 atomów węgla, połączony wiązaniem estrowym z układem porfirynowym. Głównym zadaniem fitolu jest kotwiczenie chlorofilu w błonie tylakoidu, co jest możliwe dzięki jego właściwościom **hydrofobowym**.

Należy pamiętać, że chlorofile to grupa związków o zbliżonej budowie. Różnice między nimi nie są zbyt wielkie, mają jednak duży wpływ na przebieg procesu fotosyntezy. Podstawowym rodzajem chlorofilu jest **chlorofil a**, który występuje u organizmów przeprowadzających fotosyntezę z wydzieleniem tlenu. Chlorofil ten zawarty jest zatem w chloroplastach wszystkich roślin wyższych, a także wszystkich grup glonów (w tym prokariotycznych sinic). Nie ma go natomiast u bakterii fotosyntetyzujących, które wykorzystują inne barwniki (tzw. bakteriochlorofile).

Drugi typ **chlorofilu** (oznaczany literą **b**) stanowi około jedną trzecią chlorofilu u roślin wyższych i u jednej z grup glonów – zielenic. Podobieństwo rodzajów i proporcji barwników fotosyntetycznych jest jednym z podstawowych



13.1. Budowa cząsteczek chlorofilu a i b

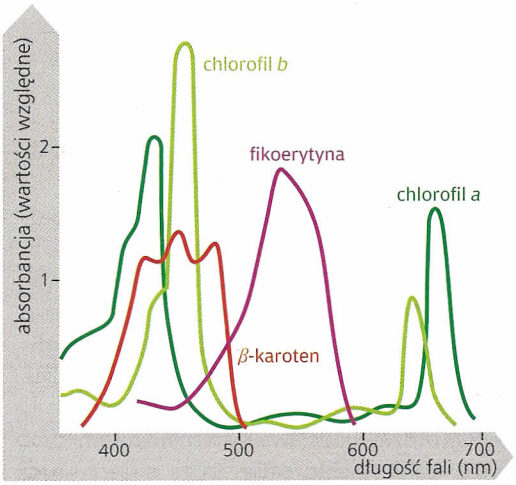
? Zwróć uwagę na stosunkowo niewielkie różnice w budowie chemicznej obu typów chlorofilu. Znajdź atom magnezu i otaczające go wiązania podwójne – jest to część odpowiedzialna za pochłanianie energii świetlnej.

argumentów przemawiających za ewolucyjnym pochodzeniem roślin od zielenic. Barwniki asymilacyjne są bardzo ważne dla systematyki glonów, ponieważ różne ich grupy wykorzystują różne chlorofile (np. brunatnice – **chlorofil c**, krasnorosty – **chlorofil d**). To zróżnicowanie ma także ogromne znaczenie dla sposobu funkcjonowania tej grupy organizmów.

Różnice między chlorofilami wpływają przede wszystkim na ich **widma absorpcyjne** (13.2.). Jak wiadomo, światło widzialne (a takie jest wykorzystywane w fotosyntezie) składa się z fal o różnej długości, a zatem – o różnej barwie. Chlorofile a i b najsilniej pochłaniają światło w dwóch zakresach widma: **niebieskim** (długość fali ok. 480 nm) i **czerwonym** (długość fali ok. 700 nm). Oznacza to, że mają po dwa maksima absorpcji. Różnią się one nieco, w efekcie chlorofil a jest niebieskozielony, a chlorofil b – żółtozielony. Połączenie tych barwników daje kolor zielony. Jest on widoczny, ponieważ oba chlorofile nie pochłaniają światła właśnie w zakresie zielonym (widzimy tylko barwy odbite w kierunku siatkówki oka, a nie pochłonięte!). Chlorofile c i d mają nieco inny kolor, więc inaczej zabarwiają komórki, w których występują.

Odmienne ubarwienie różnych grup autotrofów wynika jednak nie tylko ze zróżnicowania chlorofili. Oprócz nich w komórkach roślin występują też barwniki pomocnicze. Najpopularniejszymi są **karotenoidy**, do których należą żółtopomarańczowe **ksantofile** oraz pomarańczowoczerwone **karoteny**. Nazwa tej grupy związków pochodzi od łacińskiej nazwy marchwi (*Daucus carota*), w której korzeniu obficie występuje pomarańczowy barwnik – **β-karoten** (beta-karoten) (13.3.).

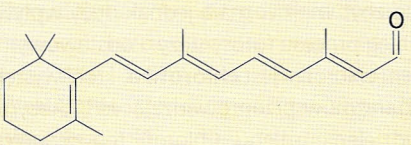
Karotenoidy wspomagają chlorofil dzięki temu, że mają inne maksimum absorpcji i pochłaniają światło w innym zakresie barw. Szczególnie dużo jest ich w bardzo ciemnych liściach, które wyłapują



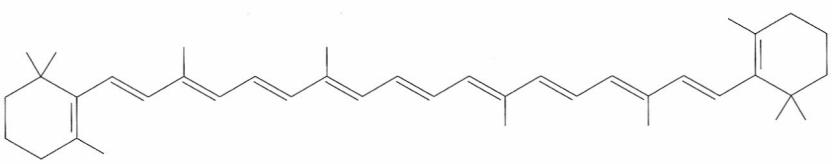
13.2. Maksima absorpcyjne wybranych barwników fotosyntetycznych na tle widma elektromagnetycznego światła białego

:: Ciekawostka

Wrażliwość karotenoidów na światło odgrywa istotną rolę w procesie widzenia. Najlepszym tego dowodem jest funkcja β-karotenu jako prowitaminy A. W wyniku przecięcia jego cząsteczki na dwie części i niewielkiego ich zmodyfikowania powstaje witamina A. Jest ona następnie przekształcana w retinal – podstawowy element purpury wzrokowej. To jeden ze światłoczułych barwników, które występują w siatkówce oka wielu zwierząt, w tym człowieka. Pod wpływem światła zmieniają one swoją formę, co generuje impuls nerwowy. Bez retinalu widzenie byłoby zatem niemożliwe.



Jedna z form cząsteczki retinalu



13.3. Budowa cząsteczki β-karotenu

:: Ciekawostka

Liście begonii zawierają dużo barwników fotosyntetycznych, co umożliwia im wyłapywanie nawet słabego i rozproszonego światła. Jest to bardzo przydatne, ponieważ w naturze rośliny te bytują w runie lasów tropikalnych. Dodatkowe barwniki, często występujące u begonii, nie biorą bezpośredniego udziału w fotosyntezie i mają za zadanie odbijanie promieni świetlnych pod odpowiednim kątem, a nawet wykształcają specjalne soczewki. Zarówno barwniki fotosyntetyczne, jak i dodatkowe służą skupieniu światła na chloroplastach.



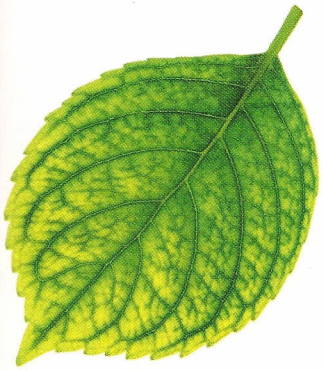
Jedna z odmian begonii królewskiej (*Begonia rex*)

dużą część światła (dlatego właśnie wydają się ciemne). Tę funkcję mogą spełniać też inne barwniki, takie jak występujące u krasnorostów **fikobiliny** (np. fikoerytryna). Karotenoidy chronią też chlorofil przed nadmiernym natężeniem światła.

Kolor, jaki ostatecznie uzyskuje roślina, jest mieszaniną barw różnych rodzajów chlorofilu i karotenoidów. Młode liście zawierają mniej barwników, dlatego są jaśniejsze. Bardzo ciemne liście zawierają dużą ilość zarówno chlorofilu, jak i karotenoidów. W innych grupach fotoautotrofów na kolor wpływają dodatkowe barwniki, stąd różnorodne kolory grup glonów.

Piękny jesienny kolor liści wynika ze zmian ilości znajdujących się w nich barwników fotosyntetycznych. Ponieważ chlorofil zawiera cenne dla rośliny składniki (w tym **azot**), jest przez nią rozkładany przed zrzuceniem liści. Wówczas kolor nadają im pozostałe barwniki, wcześniej maskowane przez dominujący barwnik zielony. Widoczne stają się przede wszystkim żółte i pomarańczowe karotenoidy.

Niektóre barwy (lub ich brak!) mogą świadczyć o chorobach rośliny. Liście bladożółte lub całkiem białe albo w ogóle nie zawierają chlorofilu i innych barwników fotosyntetycznych, albo mają ich zbyt mało. Może to być na przykład skutkiem niedoboru **magnezu** lub **żelaza** (13.4.), jak również braku światła. Chlorofil i inne barwniki nie występują w białych częściach liści roślin pstrolistnych (13.5.). To dziedziczna zmiana, wykorzystywana dla dekoracji. Bez względu na przyczynę, niedobór lub brak barwników poważnie ogranicza intensywność fotosyntezy i możliwość wzrostu rośliny (może ona w wyniku tego potrzebować więcej światła).



13.4. Chloroza wywołana brakiem żelaza



13.5. Liście pstrolistnej odmiany bluszczu

:: Doświadczenie

Rozdzielanie barwników fotosyntetycznych

Materiały: moździerz, czysty piasek lub szkło do roztarcia materiału roślinnego, zlewka, próbówka, pipeta, ołówek, miękkie liście (najlepiej ciemne, np. świeży szpinak), bibuła filtracyjna (chromatograficzna), odrobina waty, alkohol etylowy (96%), benzyna ekstrakcyjna, eter naftowy, aceton

Przygotowanie:

Przed rozpoczęciem eksperymentu należy przygotować dwa roztwory rozpuszczalników:

- mieszaninę ekstrakcyjną (20 ml benzyny i 1,7 ml alkoholu);
- mieszaninę do chromatografii (benzyna/eter naftowy/aceton w proporcjach 100/25/15). Drugi roztwór potrzebny jest w ilości pozwalającej na wypełnienie zlewki warstwą o grubości 1 centymetra.

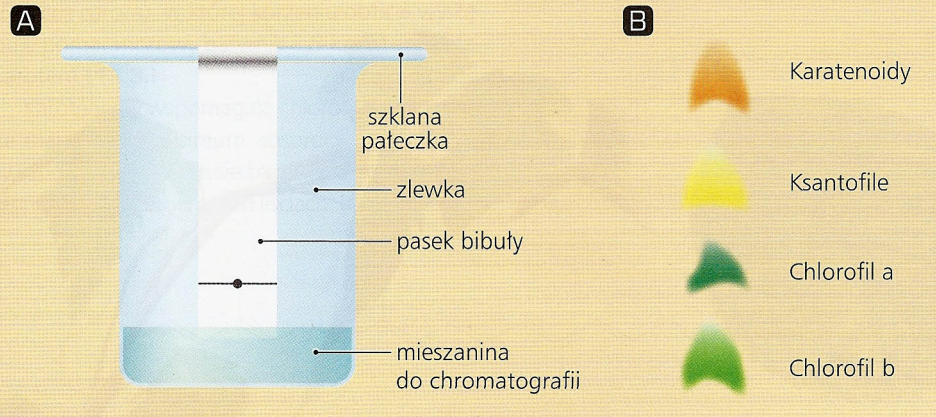
Uwaga: wykorzystywane rozpuszczalniki organiczne są **łatwopalne**, dlatego prace należy wykonywać pod wyciągiem.

Doświadczenie można przygotować na jednej lekcji, a wyniki przedstawić na następnej (po wysuszeniu bibuła dobrze się przechowuje).

Wykonanie:

1. Posiekać liście, a następnie dokładnie rozetrzeć w moździerzu z dodatkiem piasku lub szkła.
2. Powstałą papkę zalać niewielką ilością mieszaniny ekstrakcyjnej, tak aby powstał dość stężony roztwór. Odstawić go na kilka minut w celu intensywniejszej ekstrakcji, a następnie przesączyć przez watę lub bibułę do próbówki.
3. Na dość szerokim pasku bibuły o długości 15 centymetrów zaznaczyć ołówkiem linię startu (ok. 2 cm od dolnego brzegu bibuły). Nanieść na nią pipetą przesącz z próbówki (plama ma mieć średnicę ok. 1 cm) i poczekać, aż wyschnie. Zabieg powtórzyć kilkakrotnie w tym samym miejscu.
4. Pasek bibuły przypiąć do ołówka lub szklanej pałeczki i umieścić w zlewce, na dnie której znajduje się warstwa mieszaniny do chromatografii (grubości 1 cm). Poziom mieszaniny powinien sięgać poniżej naniesionej plamy. Zlewkę przykryć i odstawić na około 30 minut (pod koniec doświadczenia poziom podsączającego się rozpuszczalnika powinien sięgnąć nieco poniżej górnej krawędzi bibuły).

Wyniki:



Sposób przeprowadzenia doświadczenia (A), rezultat doświadczenia (B)

Wnioski:

- Doświadczenie wykazuje, że liście roślin zielonych zawierają mieszaninę barwników, które różnią się właściwościami chemicznymi oraz kolorem.
- Jesienią warto przeprowadzić poszerzoną wersję doświadczenia, w której porównane zostaną liście zielone z przebarwionymi na żółto lub czerwono (brak będzie pasków chlorofili). Uwaga! W przypadku liści czerwonych może pojawić się pasek dodatkowych barwników – **antocyjanów**.

PODSUMOWANIE



- Fotosynteza to proces wiązania energii światła w związkach chemicznych.
- Związki powstałe w fotosyntezie są źródłem energii dla większości organizmów żywych.
- Fotosynteza składa się z fazy jasnej (zachodzącej tylko w obecności światła) i ciemnej (mogącej zachodzić w ciemności).
- Podczas fazy jasnej światło wychwytywane jest za pomocą barwników fotosyntetycznych, przede wszystkim chlorofili i karotenoidów.

ZADANIA



1. Spośród podanych barwników fotosyntetycznych wybierz te, które występują w roślinach wyższych: chlorofil a, chlorofil b, chlorofil c, chlorofil d, fikoerytryna, bakteriochlorofil, β-karoten.
2. Wyjaśnij, jaki element budowy chlorofilu umożliwia mu pochłanianie energii.
3. Uzasadnij, że fotosynteza ma podstawowe znaczenie dla funkcjonowania życia na Ziemi.
4. Glony morskie występują na różnych głębokościach. Wiedząc, że światło czerwone bardzo słabo przenika przez wodę, spróbuj wyjaśnić, dlaczego czerwone krasnorosty są w stanie rosnąć najgłębiej ze wszystkich glonów.
5. Wymień dwie funkcje, jakie spełniają karotenoidy w komórce roślinnej.
6. Zwróć uwagę na różne kolory liści roślin w twoim otoczeniu. Weź pod uwagę ich wiek, miejsce, w którym rosną, oraz ustawienie liści względem światła. Spróbuj wyjaśnić zaobserwowane różnice, wykorzystując zdobytą wiedzę na temat barwników fotosyntetycznych.

BIBLIOGRAFIA



- Attenborough D., *Prywatne życie roślin*, Wydawnictwo „Muza", Warszawa 1996 (również film pod tym samym tytułem).
- Kiang N., *Nieziemskie kolory nieziemskich roślin*, „Świat Nauki" 2008, nr 5.

14. Faza jasna fotosyntezy

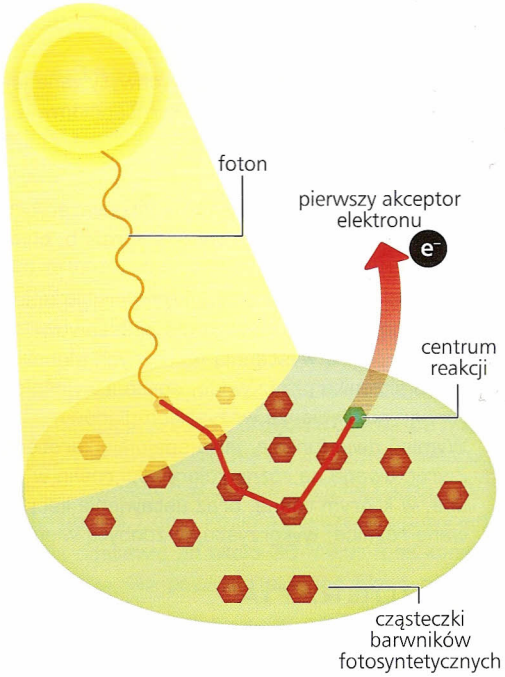
Pierwszy etap fotosyntezy jest określany mianem **fazy jasnej**, ponieważ dla jego przebiegu niezbędne jest światło. Podstawowe procesy tej fazy natychmiast ustają w ciemności. Podczas tego etapu dochodzi do przekształcenia energii światła w energię w postaci związków chemicznych. To proces kluczowy dla funkcjonowania życia na Ziemi – całość energii dostępnej dla roślin i zwierząt, a także większości reducentów, jest wiązana w ten sposób. To także jeden z najbardziej skomplikowanych procesów przeprowadzanych przez żywe organizmy, a wiele jego szczegółów jest wciąż nieznanych. Zachodzi on w tylakoidach chloroplastów, w specjalnych strukturach zwanych fotosystemami.

Fotosystemy

Istotą fazy jasnej fotosyntezy jest wiązanie energii światła w związkach bogatych w energię: **ATP** i **NADPH**. Jak już wspomniano, NADPH bierze udział w procesach redukcji zachodzących w trakcie biosyntezy różnych związków (proces anaboliczny) – zastępuje w nich NADH. Taka jest też jego rola podczas fotosyntezy. W trakcie typowej fotosyntezy elektrony z cząsteczki wody zostają pod wpływem światła przeniesione na $NADP^+$, do którego następnie dołącza się proton (czyli jon H^+). Na dalszych etapach zachodzi **fosforylacja fotosyntetyczna**, prowadząca do powstania ATP.

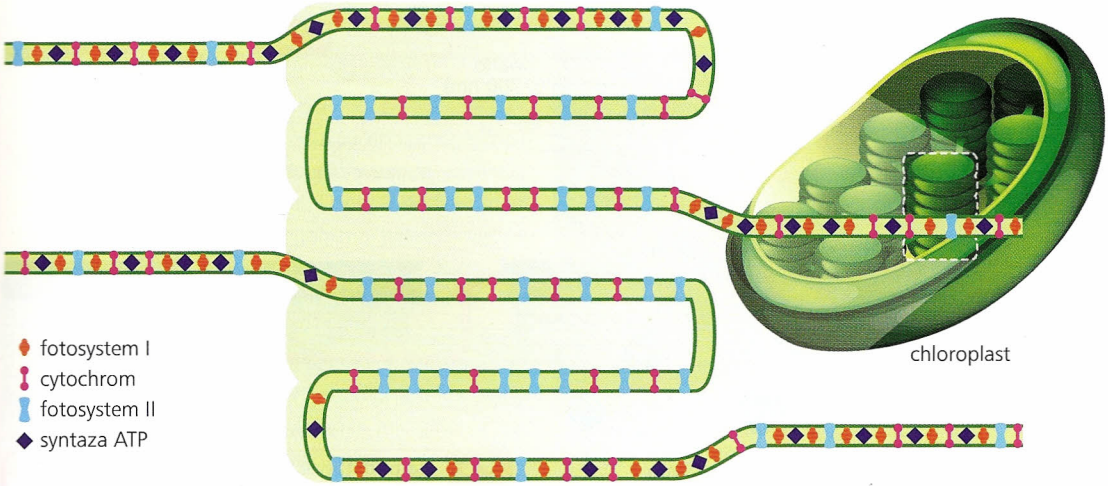
Opisane procesy są możliwe dzięki kompleksom białek, lipidów i barwników fotosyntetycznych występujących w **błonach tylakoidów** w chloroplastach. Kompleksy te nazywane są **fotosystemami** lub **fotoukładami**. Elementami odpowiedzialnymi za wyłapywanie przez nie energii światła są tak zwane **anteny energetyczne** (14.1.). Są one zbudowane z cząsteczek barwników fotosyntetycznych – głównie **chlorofilu a** i **b** oraz β-karotenu, które są pobudzane przez padające światło. Dzięki temu, że w antenie jest ich dużo (nawet kilkadziesiąt), stosunkowo niewielkie pojedyncze pobudzenia mogą być przekazywane między cząsteczkami. Zsumowane w ten sposób pobudzenie trafia do **centrum reakcji fotosystemu**, w którym znajdują się cząsteczki chlorofilu a. Znacznie zwiększa to ich energię, co powoduje wybicie z nich elektronów.

Maksima absorpcji fotosystemów zależą od tego, jakie barwniki wchodzą w skład anten energetycznych. U większości organizmów przeprowadzających fotosyntezę z wydzieleniem tlenu



14.1. Schemat działania anteny energetycznej

(rośliny, glony) występują dwa różne, ściśle współdziałające fotosystemy (14.2.). Pierwszy, określany jako **fotosystem I** (w skrócie **PSI**, z ang. *photosystem*), ma maksimum absorpcji przy długości fali światła wynoszącej 700 nanometrów. Dlatego oznacza się go również jako P700 (z ang. *pigment*). Drugi, czyli **fotosystem II** (**PSII**), ma maksimum absorpcji przy długości fali 680 nanometrów i jest określany jako P680. Organizmy przeprowadzające fotosyntezę, w której nie wydziela się tlen (należą tu niektóre bakterie), mają tylko jeden rodzaj fotosystemu, nieco różniący się maksimum absorpcji i składem chemicznym od fotosystemów roślinnych.



14.2. Rozmieszczenie fotosystemów i innych białek związanych z fotosyntezą w błonach tylakoidów

:: Ciekawostka

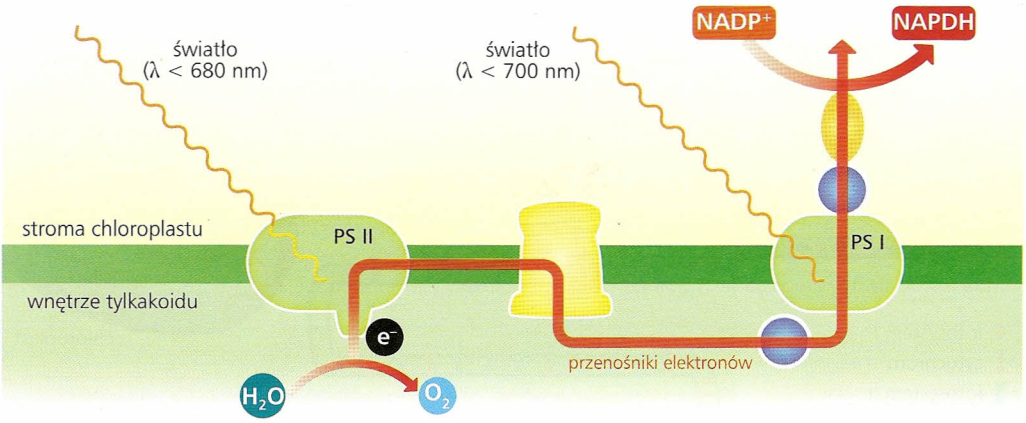
Sprawnie działające fotosystemy mają podstawowe znaczenie dla przetrwania rośliny. Wykorzystuje się ten fakt przy produkcji herbicydów, czyli związków chemicznych niszczących chwasty. Wiele z tych związków blokuje przekazywanie elektronów w fotosystemie II. Roślina nie jest wówczas w stanie prowadzić fotosyntezy, a w jej komórkach zachodzą niekontrolowane reakcje utleniania, co prowadzi do jej śmierci.

Przebieg fazy jasnej

Podczas fazy jasnej wiązanie energii zaczyna się od zebrania **fotonów** przez anteny energetyczne **fotosystemu II**. Na skutek tego dochodzi do pobudzenia chlorofilu a w centrum reakcji fotosystemu i wybicia z niego elektronu. Zwiększona energia elektronu nie rozprasza się w postaci ciepła dzięki temu, że natychmiast wychwytuje go jeden z przenośników elektronów. Dalej elektron jest przekazywany przez szereg przenośników, co w ogólnym zarysie przypomina **łańcuch oddechowy** w błonie wewnętrznej mitochondrium (tu również występuje cytochrom). W trakcie przenoszenia elektronów dochodzi również do transportu protonów ze stromy chloroplastów do wnętrza tylakoidu.

Ostatnim akceptorem elektronu pochodzącego z PSII jest białko, które przenosi go do centrum reakcji **fotosystemu I**. Najpierw jednak konieczne jest usunięcie znajdującego się w tym centrum elektronu. Zostaje on wybity na skutek przekazania energii z anten energetycznych (tak samo, jak odbyło się to w fotosystemie II). Elektron dostarczony z PSII zajmuje zatem miejsce elektronu z centrum reakcji PSI, a ten jest dalej transportowany przez łańcuch przenośników. Ostatnim etapem jest przeniesienie elektronu na $NADP^+$. Jedna cząsteczka $NADP^+$ przyłącza w sumie dwa elektrony i jeden proton H^+, w efekcie czego powstaje NADPH. Na tym kończy się droga elektronów **(14.3.)** w fazie jasnej fotosyntezy, a NADPH jest dalej wykorzystywany w reakcjach fazy ciemnej.

Ponieważ w centrum reakcji **fotosystemu II** brakuje **elektronów**, które trafiły do centrum reakcji fotosystemu I, w tylakoidzie chloroplastu dochodzi do rozkładu (**fotolizy**) cząsteczki wody. Uzyskane dzięki temu elektrony są przekazywane do centrum reakcji fotosystemu II. W ten sposób dochodzi do przywrócenia fotosystemów do stanu gotowości, w którym mogą wykorzystać następną porcję światła. Elektrony wybite z fotosystemu II trafiły do fotosystemu I, wybite z fotosystemu I połączyły się z $NADP^+$ i wykorzystywane są w dalszych reakcjach, a fotosystem II uzupełnił brak elektronów dzięki fotolizie cząsteczki wody.



14.3. Schemat przepływu elektronów podczas fazy jasnej fotosyntezy

? Na podstawie rysunku opisz drogę elektronu podczas fazy jasnej fotosyntezy.

Z rozpadu wody, oprócz elektronów potrzebnych w PSII, powstają również dwa inne produkty. Pierwszy z nich to protony H^+, bardzo ważne dla przebiegu fazy jasnej. Pierwotnie są one uwalniane do wnętrza tylakoidów, co ma duże znaczenie w procesie **fosforylacji fotosyntetycznej**, w której powstaje ATP. Po przeniesieniu do stromy chloroplastu te protony są zużywane do tworzenia NADPH, wykorzystywanego następnie w dalszych reakcjach. Jony wodoru związane z NADPH nie wracają już do chloroplastu, więc konieczne jest stałe dostarczanie nowych. Temu między innymi służy (oprócz uzyskiwania elektronów) rozkład wody przez roślinę. Drugi produkt fotolizy wody jest natomiast całkowicie zbędny zarówno dla przebiegu fazy jasnej, jak i całej fotosyntezy. W efekcie jako produkt uboczny jest usuwany z chloroplastu, a następnie – z komórki. To **tlen** (14.4.), którego wytwarzanie uznaje się za bardzo ważną cechę organizmów fotosyntezujących. Każdy ciąg przenoszenia elektronów w fotosystemach powoduje rozpad jednej cząsteczki wody, a więc dwa ciągi powodują powstanie dwóch wolnych atomów tlenu, które po połączeniu tworzą tlen cząsteczkowy (O_2).

14.4. Tlen wydzielający się podczas fotosyntezy u moczarki kanadyjskiej



Fotoliza wody jest unikalną właściwością **fotosystemu II**, który w związku z tym jest odpowiedzialny za powstawanie wolnego tlenu. Dlatego właśnie organizmy, u których nie występuje PSII, nie mogą przeprowadzać **fotosyntezy oksygenicznej** i nie wydzielają tlenu.

Fosforylacja fotosyntetyczna

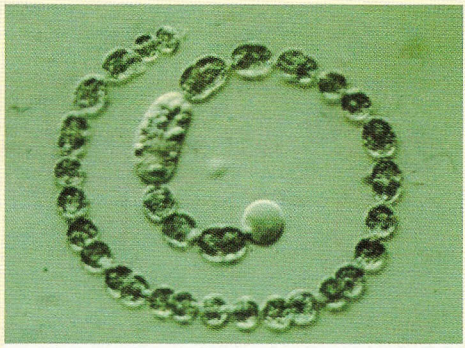
Opisane wyżej procesy fazy jasnej prowadzą do powstania dwóch produktów – NADPH oraz tlenu cząsteczkowego. Trzeci produkt tej fazy to bardzo ważny związek, który jako uniwersalny przenośnik energii jest niezbędny w dalszych etapach fotosyntezy, może też być wykorzystany w innych procesach. Chodzi oczywiście o **ATP**.

Synteza ATP zachodzi podczas tak zwanej **fosforylacji fotosyntetycznej**. Przebiega ona

:: Ciekawostka

Szok tlenowy w historii życia

Wydzielanie tlenu jako produktu ubocznego fotosyntezy przyczyniło się do pierwszego wielkiego wymierania w historii Ziemi. Około 2,4 miliarda lat temu sinice – pierwsze organizmy przeprowadzające fotosyntezę tlenową – wytworzyły duże ilości tlenu, który zgromadził się w atmosferze. Ten silnie reaktywny pierwiastek okazał się zabójczy dla dominujących wtedy organizmów beztlenowych. Dopiero adaptacja części organizmów do oddychania tlenowego (np. powstanie mitochondriów) umożliwiła ogromny rozkwit życia.

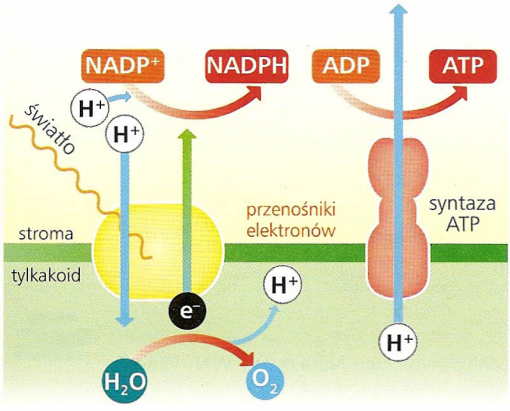


Sinica z rodzaju *Anabaena* – przedstawiciel pierwszych organizmów wydzielających tlen podczas fotosyntezy

bardzo podobnie do fosforylacji oksydacyjnej, zachodzącej w mitochondriach w trakcie oddychania tlenowego, i również jest zgodna z założeniami **hipotezy chemiosmotycznej Mitchella**. Według tej hipotezy różnica stężeń protonów po dwóch stronach błony jest wykorzystywana przez kompleks **syntazy ATP** do tworzenia ATP z cząsteczki ADP i reszt fosforanowych. Protony H^+ przechodzą w tym czasie przez kanał wewnętrzny syntazy ATP i różnica stężeń maleje.

Podczas fazy jasnej fotosyntezy dochodzi do powstania różnicy stężeń po dwóch stronach błony tylakoidu, jednak nie pojawia się różnica potencjałów (inaczej niż w mitochondriach). Podobnie jak podczas fosforylacji oksydacyjnej,

? Przeanalizuj ilustrację i wskaż reakcje, które prowadzą do powstania różnicy stężeń protonów po obu stronach błony tylakoidu.

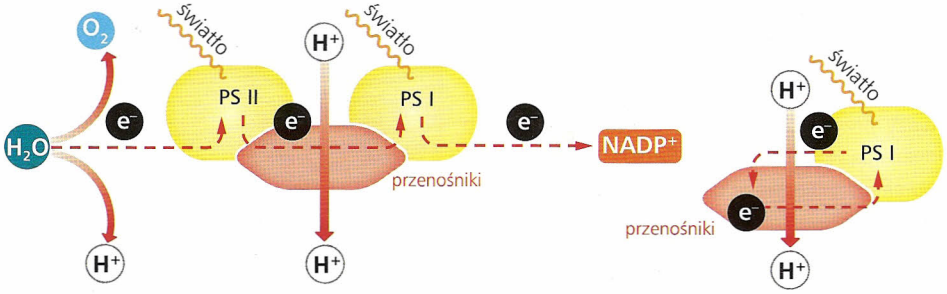


14.5. Powstawanie gradientu protonów wodorowych i synteza ATP

wyższe stężenie protonów występuje wewnątrz pęcherzyków tylakoidów (a więc odpowiedniku wnętrza grzebieni mitochondriów), niższe – w **stromie** (która jest odpowiednikiem matriks mitochondrium) **(14.5.)**.

Wewnątrz pęcherzyka tylakoidu stężenie protonów rośnie z kilku powodów. Dużo protonów dostarcza wspomniany wcześniej rozkład wody – są one uwalniane właśnie do wnętrza tylakoidu. Przede wszystkim jednak są one przenoszone ze stromy podczas transportu elektronów w fotosystemach. Przepływ elektronów powoduje nie tylko wzrost liczby protonów w tylakoidzie i spadek ich liczby w stromie na skutek przeniesienia ich przez błonę. Pod koniec transportu elektrony trafiają na $NADP^+$, co prowadzi do powstania NADPH. Do utworzenia jednej jego cząsteczki potrzebny jest jeden proton H^+. Jest on pobierany ze stromy chloroplastu (gdzie NADPH powstaje). Efektem jest spadek liczby protonów w stromie i zwiększenie różnicy stężeń między stromą a wnętrzem tylakoidu.

Opisany wyżej mechanizm to standardowy proces tworzenia ATP w chloroplaście. Nosi on nazwę **fosforylacji niecyklicznej**. Jednak w przypadku dużego zapotrzebowania komórki na **ATP** w stosunku do NADPH uruchamiany jest inny mechanizm, który wykorzystuje tylko fotosystem I. Elektron wybity z jego centrum reakcji jest przekazywany przez szereg przenośników, które na końcu przekazują go z powrotem do fotosystemu I (a nie na $NADP^+$). Nie dochodzi więc do powstania NADPH i do rozkładu wody, nie jest też uwalniany tlen, do czego konieczna



14.6. Porównanie niecyklicznego i cyklicznego transportu elektronów podczas fazy jasnej

? Porównaj wędrówkę elektronów w obu typach fosforylacji fotosyntetycznej.

jest aktywność fotosystemu II. Tworzy się jednak gradient protonów pomiędzy wnętrzem tylakoidów i stromą. Jest on następnie wykorzystywany w procesie fosforylacji do wytworzenia ATP. Ten typ fosforylacji fotosyntetycznej określany jest jako **fosforylacja cykliczna** (14.6.), od cyklicznego obiegu elektronu w fotosystemie I. Bardzo podobny przebieg ma fotosynteza przeprowadzana przez niewydzielające tlenu bakterie fotosyntetyzujące.

Wytworzone podczas fosforylacji fotosyntetycznej ATP oraz NADPH stanowią tak zwaną **siłę asymilacyjną**, wykorzystywaną następnie w trakcie **fazy ciemnej** do syntezy węglowodanów. Na każde osiem zaabsorbowanych fotonów, w normalnym przebiegu fazy jasnej tworzone są trzy cząsteczki **ATP** i dwie cząsteczki **NADPH**. Wydziela się też jedna cząsteczka tlenu. Fosforylacja cykliczna jest nieco wydajniejsza w produkcji ATP, nie powstają w niej jednak NADPH i tlen.

PODSUMOWANIE

- Pierwszym etapem fotosyntezy jest tak zwana faza jasna, do której przebiegu niezbędna jest obecność światła (zachodzące w jej trakcie procesy w ciemności natychmiast ustają).
- Reakcje fazy jasnej zachodzą w występujących w błonach chloroplastów kompleksach białek, lipidów i barwników fotosyntetycznych, określanych jako fotosystemy I i II.
- Zasadniczym elementem fazy jasnej jest transport elektronów wybitych przez światło z chlorofilu przez szereg przekaźników.
- Gradient protonów H^+ jest wykorzystywany do syntezy ATP w procesie fosforylacji fotosyntetycznej.
- Elektrony w centrum reakcji PSII są uzupełniane dzięki rozkładowi wody, czemu towarzyszy wydzielanie się tlenu.
- Powstałe w trakcie fazy jasnej NADPH i ATP to siła asymilacyjna, wykorzystywana w reakcjach fazy ciemnej.

ZADANIA

1. Opisz, jak zbudowane są fotosystemy i w jaki sposób dochodzi do uwolnienia z nich elektronów.
2. Podaj główne etapy transportu elektronu podczas fazy jasnej fotosyntezy.
3. Opisz mechanizm fosforylacji fotosyntetycznej.

BIBLIOGRAFIA

- Kopcewicz J., Lewak S. (red.), *Fizjologia roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- Tonecki J., *Czy zimą należy doświetlać rośliny pokojowe?*, „Świat Nauki" 2009, nr 2.

15. Faza ciemna fotosyntezy

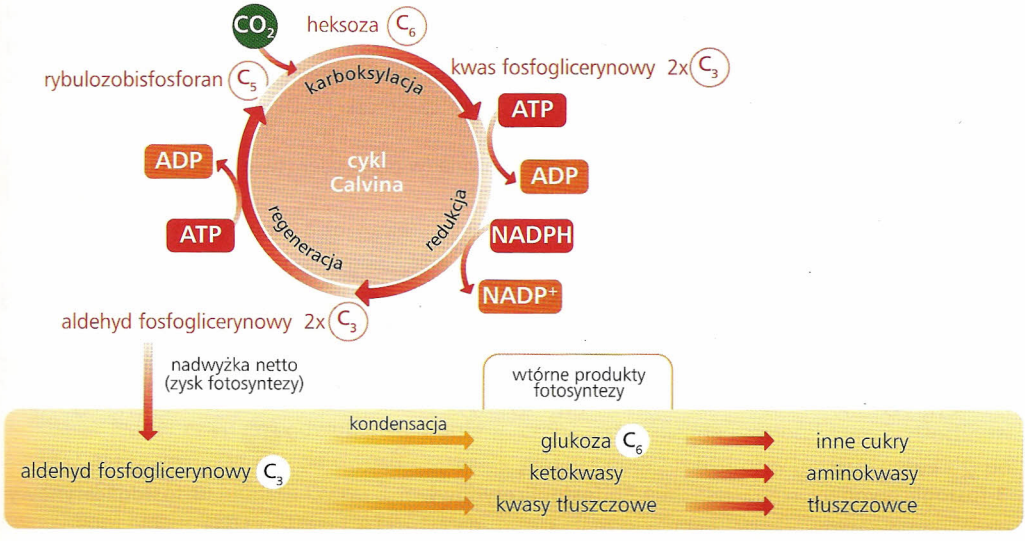
Druga faza fotosyntezy, tak zwana **faza ciemna**, nie jest bezpośrednio zależna od światła. Może zatem zachodzić w całkowitej ciemności, o ile dostępne są konieczne do jej przebiegu produkty fazy jasnej. Te pierwotne, nietrwałe produkty fotosyntezy (czyli siła asymilacyjna) są w fazie ciemnej wykorzystywane do syntezy węglowodanów, które mogą być następnie przekształcane w substancje zapasowe lub inne kategorie związków organicznych. Podczas syntezy węglowodanów asymilowany jest dwutlenek węgla. Cały ten proces ma postać cyklu, od nazwiska odkrywcy nazywanego **cyklem Calvina**.

Cykl Calvina

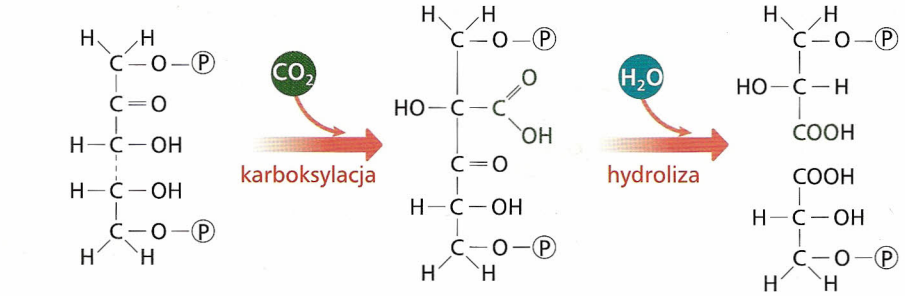
Reakcje zachodzące podczas fazy ciemnej prowadzą do przekształcenia wytworzonej w fazie jasnej **siły asymilacyjnej** w węglowodany. Bardzo ważnym elementem tego procesu jest asymilacja dwutlenku węgla. Są to złożone przemiany związków chemicznych, zachodzące w sposób cykliczny. Badania nad asymilacją dwutlenku węgla u roślin wykazały, że pierwszym jej produktem są kwasy organiczne zawierające trzy atomy węgla. Poznanie tego mechanizmu jest zasługą zespołu naukowców kierowanego przez Melvina Calvina. Za swoje osiągnięcia otrzymał on w 1961 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii. Odkryty cykl nazwano **cyklem Calvina** (lub **cyklem Calvina–Bensona**, uwzględniając jednego ze współodkrywców).

Cykl Calvina **(15.1.)** zachodzi w stromie chloroplastów, w której są obecne dwa spośród jego substratów powstałe podczas fazy jasnej – **NADPH** i **ATP**. Trzeci substrat, dwutlenek węgla, pochodzi z atmosfery. W stromie stale znajdują się ponadto enzymy katalizujące reakcje cyklu Calvina oraz związek, do którego przyłączany jest dwutlenek węgla na początkowym etapie cyklu. Jest nim pięciowęglowa fosforanowa pochodna rybozy, czyli **rybulozo-1,5-bisfosforan**. Od tego akceptora pochodzi jeszcze inna nazwa cyklu – **redukcyjny cykl pentozofosforanowy**.

Cykl Calvina składa się z trzech głównych etapów – **karboksylacji**, **redukcji** oraz **regeneracji**. **Karboksylacja** to pierwszy i stosunkowo najkrótszy etap, ma jednak ogromne znaczenie dla wydaj-



15.1. Ogólny schemat cyklu Calvina i możliwe dalsze przemiany aldehydu 3-fosfoglicerynowego



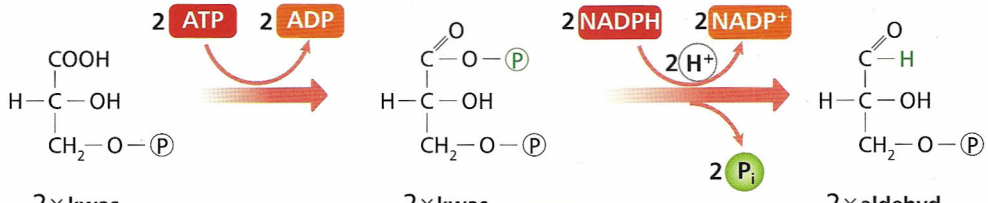
15.2. Przebieg fazy karboksylacji: na zielono zaznaczono dołączany dwutlenek węgla, podano też ilości reagentów przypadające na jedną związaną cząsteczkę CO_2.

ności procesu fotosyntezy **(15.2.)**. W jego trakcie dwutlenek węgla przyłącza się do rybulozo-1,5-bisfosforanu. Reakcja ta katalizowana jest przez **karboksylazę rybulozo-1,5-bisfosforanu**, enzym inaczej określany jako **rubisco** (z ang. *ribulose bisphosphate carboxylase-oxygenase*). Występuje on bardzo powszechnie – stanowi około 30% wszystkich białek liścia, jest też najczęściej spotykanym białkiem w biosferze! Wynika to między innymi ze stosunkowo wolnego działania tego enzymu, którego mała wydajność musi być nadrabiana olbrzymią liczbą funkcjonujących cząsteczek.

Produktem przyłączenia dwutlenku węgla do rybulozo-1,5-bisfosforanu jest bardzo nietrwały związek sześciowęglowy (heksoza), do którego od razu dołączana jest cząsteczka wody (dostarczona do liścia przez tkanki przewodzące). Prowadzi to do rozpadu (**hydrolizy**) heksozy na dwie cząsteczki trójwęglowego **kwasu 3-fosfoglicerynowego**. Dołączony dwutlenek węgla tworzy **grupę karboksylową** jednej z tych cząsteczek, druga cząsteczka powstaje w całości z atomów zawartych w rybulozo-1,5-bisfosforanie.

Kolejny etap cyklu Calvina jest określany jako **faza redukcyjna (15.1., 15.3.)**. **Siła asymilacyjna** powstała podczas fazy jasnej jest w niej wykorzystywana do redukcji **kwasu 3-fosfoglicerynowego**. Aby do tego doszło, kwas ten jest najpierw aktywowany za pomocą ATP. Na każdą cząsteczkę kwasu zużywana jest jedna cząsteczka ATP. Ponieważ w wyniku asymilacji cząsteczki dwutlenku węgla powstały dwie cząsteczki kwasu, na każdą dołączoną cząsteczkę CO_2 zostają zużyte dwie cząsteczki ATP. Następnie aktywowany kwas 3-fosfoglicerynowy ulega redukcji do **aldehydu 3-fosfoglicerynowego**. Do tego celu wykorzystywany jest NADPH – jedna cząsteczka na cząsteczkę aldehydu. Na jedną zasymilowaną cząsteczkę dwutlenku węgla zużywane są więc dwie cząsteczki NADPH.

? Wyjaśnij, dlaczego w fazie redukcyjnej cyklu Calvina (w przeciwieństwie do poprzedniej fazy) wszystkie reagenty występują w podwójnej liczbie.



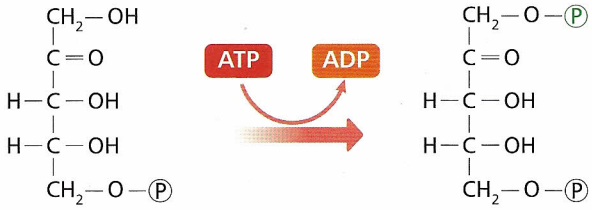
15.3. Faza redukcyjna cyklu Calvina; podano ilości reagentów przypadające na jedną cząsteczkę dwutlenku węgla związaną wcześniej w fazie karboksylacji.

Z powstałych dwóch cząsteczek aldehydu tylko jedna – i w dodatku tylko w jednej trzeciej – składa się z nowo związanego dwutlenku węgla. Dwa pozostałe tworzące ją atomy węgla (i wszystkie trzy drugiej cząsteczki) pochodzą z rybulozo-1,5-bisfosforanu. Aby powstał aldehyd składający się w całości z atomów węgla pochodzących z CO_2, potrzebne byłoby zatem dołączenie w sumie trzech cząsteczek tego gazu, a nie jednej. Natomiast jeśli w wyniku cyklu Calvina ma powstać cząsteczka glukozy, konieczne jest związanie sześciu cząsteczek dwutlenku węgla. Powstaje wówczas dwanaście cząsteczek trójwęglowego **aldehydu 3-fosfoglicerynowego**. Jednak tylko dwie z nich są rzeczywistym produktem cyklu i mogą być wykorzystane do syntezy glukozy. Pozostałe dziesięć cząsteczek zostaje w cyklu i bierze udział w **fazie regeneracyjnej**. To skomplikowany ciąg reakcji, których celem jest odtworzenie cząsteczek cukru pięciowęglowego z powstałych w cyklu cząsteczek trójwęglowych. Efektem tych przemian jest rybulozo-5-fosforan. Ostatnim etapem regeneracji **(15.4.)** jest dołączenie do niego reszty fosforanowej z ATP i odtworzenie rybulozo-1,5-bisfosforanu. Zamyka to cykl Calvina i umożliwia przyłączenie następnej cząsteczki dwutlenku węgla.

Do prowadzonego wyżej bilansu dotyczącego jednej związanej cząsteczki dwutlenku węgla należałoby (w związku z fosforylacją rybulozo-5-fosforanu) dopisać jeszcze jedną cząsteczkę ATP. W fazie regeneracji bowiem na związaną w fazie karboksylacji cząsteczkę CO_2 przypada tylko jedna cząsteczka pentozy, a nie dwie triozy, jak to było w fazie redukcji. Do przeprowadzenia fosforylacji jednej cząsteczki rybulozo-5-fosforanu zużywana jest więc tylko jedna cząsteczka ATP – nie ma potrzeby podwajania liczby cząsteczek, jak w fazie redukcyjnej **(15.4.)**.

:: Ciekawostka

Dla zwierząt, które nie mogą uzyskać NADPH na drodze fotosyntezy, jego źródłem jest tak zwany szlak pentozofosforanowy. Podczas pierwszego jego etapu glukozo-6-fosforan jest utleniony do rybulozo-5-fosforanu. Dochodzi wtedy do dekarboksylacji (uwalniany jest dwutlenek węgla) i syntezy NADPH. Jest to więc proces odwrotny do cyklu Calvina, chociaż wiele enzymów wykorzystywanych w obu cyklach jest identycznych. Stanowi to przykład oszczędności ewolucji. Oprócz produkcji NADPH, szlak pentozofosforanowy jest też źródłem cukrów pięciowęglowych, wykorzystywanych do syntezy nukleotydów.



rybulozo 5-fosforan **rybulozo 1,5-bisfosforan**

15.4. Fosforylacja kończąca fazę redukcyjną cyklu Calvina; podano ilości reagentów przypadające na jedną cząsteczkę dwutlenku węgla związaną wcześniej w fazie karboksylacji.

Bilans fotosyntezy

Asymilacja jednej cząsteczki dwutlenku węgla w cyklu Calvina wymaga zużycia dwóch cząsteczek **NADPH** (w fazie redukcji kwasu 3-fosfoglicerynowego) oraz trzech cząsteczek **ATP** (dwóch w fazie redukcji i jednej podczas regeneracji rybulozo-1,5-bisfosforanu). W fazie karboksylacji włączana jest też jedna cząsteczka wody. Dochodzi do tego podczas hydrolizy heksozy powstałej po asymilacji dwutlenku węgla.

Celem przemian jest wytworzenie cząsteczki triozy (aldehydu 3-fosfoglicerynowego), która może zostać wyprowadzona z cyklu. Tylko wte-

dy jest też możliwe odtworzenie rybulozo-1,5-bisfosforanu. Ponieważ jedna cząsteczka triozy zawiera trzy atomy węgla (do jej uzyskania potrzebne są trzy cząsteczki dwutlenku węgla), wymaganą ilość ATP i NADPH należy odpowiednio pomnożyć. Zatem do wytworzenia cząsteczki triozy potrzeba dziewięciu cząsteczek ATP i sześciu cząsteczek NADPH. Zużywane są też trzy cząsteczki wody.

Aldehyd 3-fosfoglicerynowy jest pierwszym trwałym produktem fotosyntezy. Jego synteza podczas fazy ciemnej powoduje ciągły wzrost stężenia tego związku w stromie chloroplastu. Podstawowymi węglowodanami wykorzystywanymi przez rośliny, a także zwierzęta, są natomiast heksozy (glukoza i fruktoza) oraz ich polimery (np. sacharoza, skrobia, celuloza). Aby je uzyskać, podczas ciągu przemian z dwóch cząsteczek aldehydu 3-fosfogilcerynowego powstaje glukoza lub fruktoza. Wytworzenie jednej cząsteczki heksozy wymaga związania sześciu cząsteczek dwutlenku węgla. Ogólny bilans **fazy ciemnej** fotosyntezy przedstawia się zatem następująco:

$$6\ CO_2 + 18\ ATP + 12\ NADPH + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 18\ ADP + 18\ Pi + 12\ NADP^+$$

Biorąc pod uwagę cały proces, obejmujący **fazę jasną** i **ciemną**, równanie podsumowujące fotosyntezę tlenową (a więc najbardziej typową, występującą u roślin, glonów i sinic) wygląda następująco:

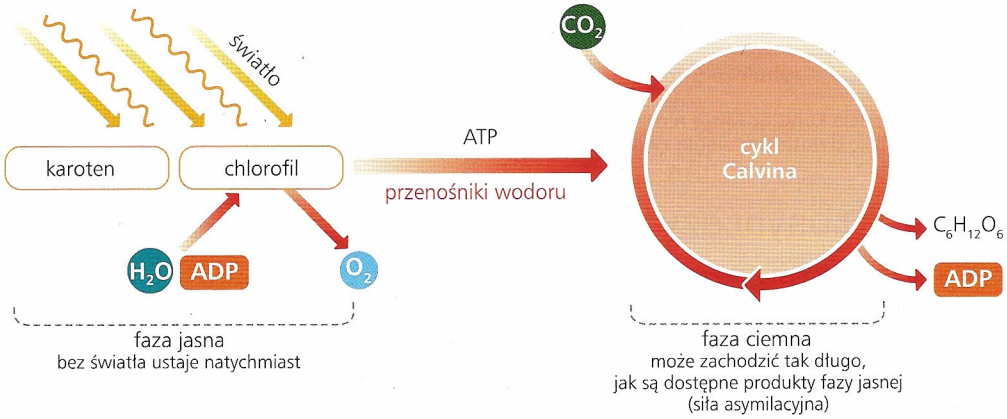
$$6\ CO_2 + 6\ H_2O + \text{energia świetlna} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Równanie to zapisano w formie uproszczonej, pomijającej reagenty pojawiające się zarówno po stronie produktów, jak i substratów. Warto pamiętać, że tlen wydzielający się w procesie fotosyntezy nie powstaje z dwutlenku węgla. Jest on produktem ubocznym **fotolizy wody**, wykorzystywanej w fazie jasnej jako źródło elektronów i protonów. Dwutlenek węgla zużywany jest w całości (wliczając w to atomy tlenu) do budowy związków organicznych. Właśnie dlatego możliwa jest **fotosynteza beztlenowa**, w trakcie której nie wydziela się tlen. Przeprowadzające ją organizmy wykorzystują jako źródło elektronów i wodoru inne związki niż woda, najczęściej **siarkowodór** (H_2S). W przeciwieństwie do chemosyntezy (którą szerzej omówiono w rozdziale 17), produktem fotosyntezy beztlenowej jest wolna siarka, a nie jej tlenki. Źródłem wodoru i elektronów mogą też być inne związki, w tym proste substancje organiczne, występujące w dużych ilościach.

Faza ciemna fotosyntezy ma natomiast zadziwiająco podobny przebieg u niemal wszystkich organizmów (wyjątkiem są niektóre grupy bakterii). Jest to proces bardzo stary, znacznie poprzedzający pojawienie się tlenu w atmosferze. Ma to zresztą konsekwencje, które dokładniej przedstawiono w następnym rozdziale.

Wydajność fotosyntezy

Pomimo swojej długiej ewolucyjnej historii (a może właśnie w związku z nią) **cykl Calvina** jest bardzo wydajny energetycznie. Blisko 90%



15.5. Zestawienie reakcji zachodzących podczas obu faz fotosyntezy

energii zawartej w ATP i NADPH zostaje związane w cząsteczkach glukozy i może zostać wykorzystane przez rośliny i odżywiające się nimi organizmy. To znacznie więcej niż w przypadku fazy jasnej, w trakcie której w celu wytworzenia siły asymilacyjnej potrzebnej dla związania jednej cząsteczki CO_2 konieczne było wyłapanie aż ośmiu fotonów światła. Dla utworzenia jednej cząsteczki glukozy konieczne jest więc wychwycenie 48 fotonów. W sile asymilacyjnej roślinie udaje się związać niecałe 38% energii fotonów (i to przy założeniu, że wykorzystane były fotony światła czerwonego, a więc niosącego najmniej energii).

Łączna wydajność obu faz fotosyntezy **(15.5.)**, od wyłapania fotonów do wytworzenia glukozy, wynosi około 33%. Warto jednak pamiętać, że nie wszystkie fotony są wyłapywane przez liście, a duża ich część przechodzi przez nie niewykorzystana. Rośliny pochłaniają światło jedynie w wąskim zakresie widma – takim, w którym reagują barwniki fotosyntetyczne. Szacuje się więc, że nawet w optymalnych warunkach rośliny są w stanie zmagazynować nie więcej niż 5,5% docierającej do nich energii słonecznej. Jednak w związku z powszechnością organizmów przeprowadzających fotosyntezę, ilość produkowanych w tym procesie węglowodanów jest ogromna.

PODSUMOWANIE



- Drugi etap fotosyntezy określamy mianem fazy ciemnej, ponieważ może zachodzić bez dostępu do światła (konieczna jest jednak obecność siły asymilacyjnej wytworzonej podczas fazy jasnej).
- Podstawowym zadaniem fazy ciemnej jest związanie dwutlenku węgla w związkach organicznych przy wykorzystaniu siły asymilacyjnej. Proces ten ma postać cyklu reakcji, który od nazwiska jego odkrywcy nazwano cyklem Calvina.
- Cykl Calvina składa się z trzech faz: karboksylacji, redukcji i regeneracji.
- Faza karboksylacji jest katalizowana przez enzym rubisco i polega na przyłączeniu dwutlenku węgla do rybulozo 1,5-bisfosforanu, a następnie – na hydrolizie powstałego związku.
- W fazie redukcji ATP i NADPH są wykorzystywane do redukcji kwasu 3-fosfoglicerynowego do aldehydu 3-fosfoglicerynowego.
- W fazie regeneracji z większości cząsteczek aldehydu 3-fosfoglicerynowego odtwarzany jest rybulozo-1,5-bisfosforan.
- Trzy pełne cykle przemian pozwalają na powstanie jednej dodatkowej cząsteczki aldehydu 3-fosfoglicerynowego, która może być wykorzystana do syntezy innych związków.
- Wytworzenie jednej cząsteczki aldehydu 3-fosfoglicerynowego wymaga wykorzystania dziewięciu cząsteczek ATP i sześciu cząsteczek NADPH, a także trzech cząsteczek CO_2 i trzech cząsteczek H_2O.
- Dwie cząsteczki aldehydu 3-fosfoglicerynowego mogą być wykorzystane do syntezy jednej cząsteczki glukozy.

ZADANIA



1. Sporządź tabelę, w której porównasz substraty i produkty fazy jasnej i ciemnej fotosyntezy oraz ich zależność od światła.
2. Wyjaśnij, dlaczego tylko jedna na sześć powstałych w cyklu Calvina cząsteczek aldehydu 3-fosfoglicerynowego może być wykorzystana do syntezy innych związków.
3. Wyjaśnij, dlaczego w fazie redukcji na każdą związaną cząsteczkę dwutlenku węgla wykorzystywane są dwie cząsteczki ATP, a w fazie regeneracji – tylko jedna.

W INTERNECIE



- http://highered.mcgraw-hill.com/sites/0070960526/student_view0/chapter5/animation_quiz_1.html
- http://www.uic.edu/classes/bios/bios100/lectures/ps01.ht

16. Czynniki wpływające na intensywność fotosyntezy

Warunki, w jakich przebiega fotosynteza, zwykle odbiegają od optymalnych. Rośliny często rosną w miejscach, w których występuje niedobór wody, panują zbyt niskie lub zbyt wysokie temperatury, nie dociera odpowiednia ilość światła. W dużej mierze wpływa to na rzeczywistą **wydajność fotosyntezy**. Ponieważ jednak ten proces ma dla roślin ogromne znaczenie, stosują one mechanizmy umożliwiające im przetrwanie nawet w niekorzystnych warunkach.

Dwutlenek węgla

Fotooddychanie

Ponieważ dwutlenek węgla występuje w atmosferze w dużych ilościach, jego brak nie powinien być dla roślin problemem. Jednak nawet pomimo wzrostu stężenia tego gazu w powietrzu spowodowanego gospodarką człowieka, wiązanie dwutlenku węgla w **cyklu Calvina** jest czasem utrudnione. Wynika to z faktu, że jest to bardzo stary proces, który wykształcił się, gdy atmosfera była znacznie bogatsza w CO_2. Gdy w powietrzu występuje duże stężenie tlenu, jeden z najważniejszych enzymów cyklu Calvina – **rubisco** – przeprowadza reakcję **rybulozo-1,6-bisfosofranu** właśnie z tlenem. Konkuruje on z dwutlenkiem węgla w wiązaniu się do enzymu. Zapoczątkowuje to serię przemian, których efektem końcowym jest wydzielenie dwutlenku węgla. Podczas tego procesu pobierany jest tlen i wydzielany dwutlenek węgla, dlatego nazwano go **fotooddychaniem**.

Fotooddychanie jest bardzo niekorzystne energetycznie, ponieważ prowadzi do rozpadu rybulozo-1,6-bisfosofranu z wydzieleniem dwutlenku węgla. Powoduje to utratę energii zawartej w związku organicznym, dlatego nie może być ona wykorzystana do syntezy ATP. Wręcz przeciwnie, **ATP** i **NADPH** są podczas tego procesu zużywane! Fotooddychanie stanowi więc dla rośliny poważny problem. Największe szkody powoduje, gdy dwutlenek węgla jest intensywnie wykorzystywany i jego stężenie spada, czyli wtedy gdy fotosynteza zachodzi bardzo intensywnie. Podstawowym mechanizmem służącym zminimalizowaniu tych szkód stało się zwiększenie powinowactwa rubisco do dwutlenku węgla. Pozwala to na o wiele wydajniejsze wiązanie go w niższych stężeniach. Dzięki temu, mimo że stężenie tlenu w powietrzu jest znacznie wyższe niż dwutlenku węgla, reakcja **karboksylacji** rozpoczynająca cykl Calvina przebiega z czterokrotnie większą intensywnością niż fotooddychanie. Jest to wynikiem doskonalenia aktywności rubisco na drodze ewolucji – u roślin wyższych jest ona ośmiokrotnie większa niż u bakterii fotosyntetyzujących!

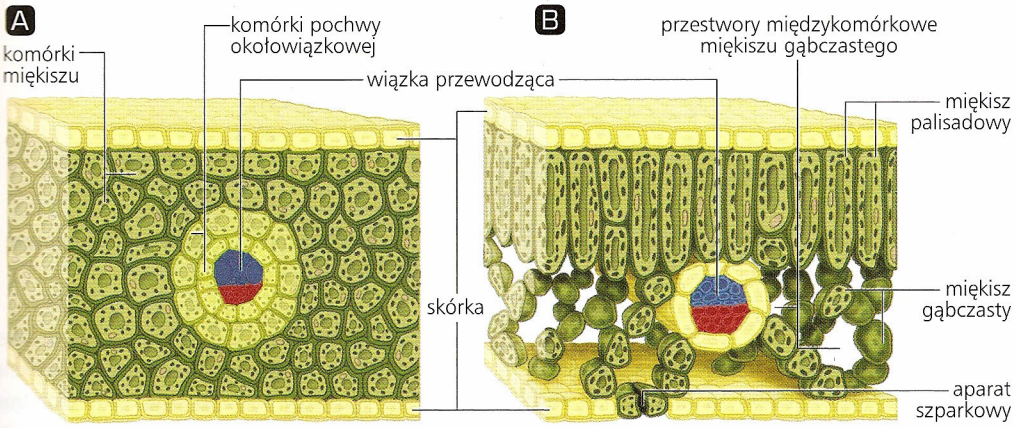
Fotosynteza typu C_4

Dodatkowy mechanizm ograniczający fotooddychanie rozwinął się u tak zwanych **roślin typu C_4**. Pierwotne wiązanie dwutlenku węgla z powietrza jest u nich oddzielone przestrzennie od fazy ciemnej fotosyntezy. Sprzyja to zwiększaniu stężenia tego gazu w chloroplastach.

U większości roślin dwutlenek węgla dostaje się bezpośrednio do komórek przeprowadzających fotosyntezę dzięki systemowi przestrzeni międzykomórkowych w miękiszu gąbczastym **(16.1.)**. W komórkach transportowany jest w postaci rozpuszczonej bezpośrednio do chloroplastów. W stromie zostaje związany w cyklu Calvina dzięki enzymowi rubisco, w wyniku czego powstaje trójwęglowy **kwas 3-fosfoglicerynowy**. Od liczby atomów węgla zawartej w tym pierwszym produkcie asymilacji dwutlenku węgla pochodzi określenie standardowego typu fotosyntezy – jest to **fotosynteza C_3**.

Różnice między roślinami przeprowadzającymi **fotosyntezę C_4** a przeprowadzającymi fotosyntezę C_3, widoczne są już na poziomie budowy liścia. Przede wszystkim u roślin typu C_4 nie występuje rozprowadzający gazy miękisz gąbczasty. Zamiast

? Wyjaśnij rolę przestworów międzykomórkowych miękiszu gąbczastego.

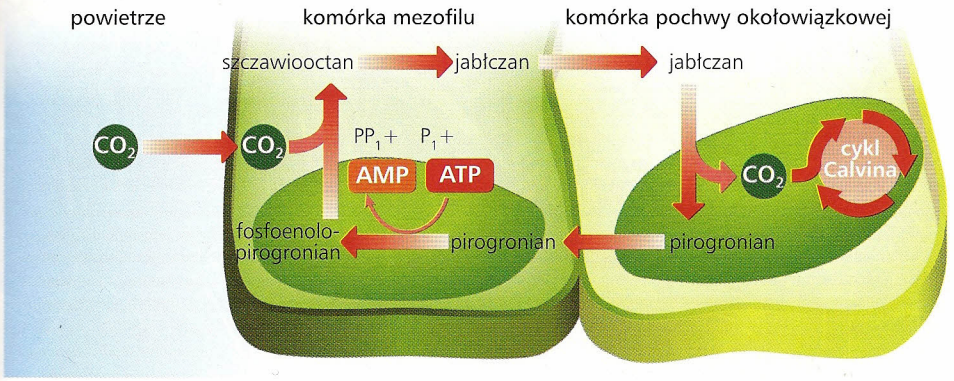


16.1. Porównanie budowy blaszki liściowej roślin przeprowadzających fotosyntezę typu C_4 (A) i C_3 (B)

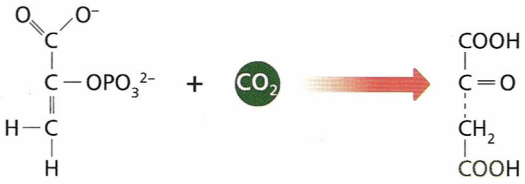
tego w otoczeniu wiązek przewodzących liścia tworzy się specjalna **pochwa okołowiązkowa** (inaczej **miękisz wieńcowy**). Jest ona głównym miejscem przeprowadzania fazy ciemnej fotosyntezy, czyli tu właśnie siła asymilacyjna jest wykorzystywana do syntezy aldehydu 3-fosfoglicerynowego z dwutlenku węgla i wody. Natomiast wstępne, tymczasowe wiązanie dwutlenku węgla jest oddzielone przestrzennie **(16.2.)** i zachodzi w mezofilu (czyli komórkach miękiszu asymilacyjnego liścia poza pochwą okołowiązkową). Reakcję tę przeprowadza nie rubisco, a całkowicie inny enzym. Katalizuje on przyłączanie dwutlenku węgla do trójwęglowego fosfoenolopirogroniaiu, czego efektem jest powstanie czterowęglowego szczawiooctanu (kwasu szczawiooctowego) **(16.3.)**. Jest on pierwszym produktem asymilacji dwutlenku węgla i od liczby tworzących go atomów węgla pochodzi nazwa fotosyntezy **C_4**. Szczawiooctan jest następnie przekształcany w jabłczan i transportowany plazmodesmami do komórek pochwy okołowiązkowej. W nich jest rozkładany, co powoduje uwolnienie dwutlenku węgla i umożliwia włączenie go do cyklu Calvina. **Pirogronian** utworzony przez odłączenie dwutlenku węgla od jabłaczanu jest transportowany z powrotem do komórek mezofilu. Tam, przy udziale ATP, jest przekształcany do fosfoenolopirogronianu zdolnego do przyłączenia kolejnej cząsteczki CO_2.

Ten specyficzny mechanizm transportu umożliwia nawet dwudziestokrotne zwiększenie stężenia dwutlenku węgla w komórkach pochwy okołowiązkowej w stosunku do komó-

? Na podstawie ilustracji określ, w jakich komórkach roślin typu C_4 dwutlenek węgla jest pochłaniany, a w jakich wykorzystywany do produkcji związków organicznych.



16.2. Mechanizm wiązania i transportu dwutlenku węgla u roślin typu C_4



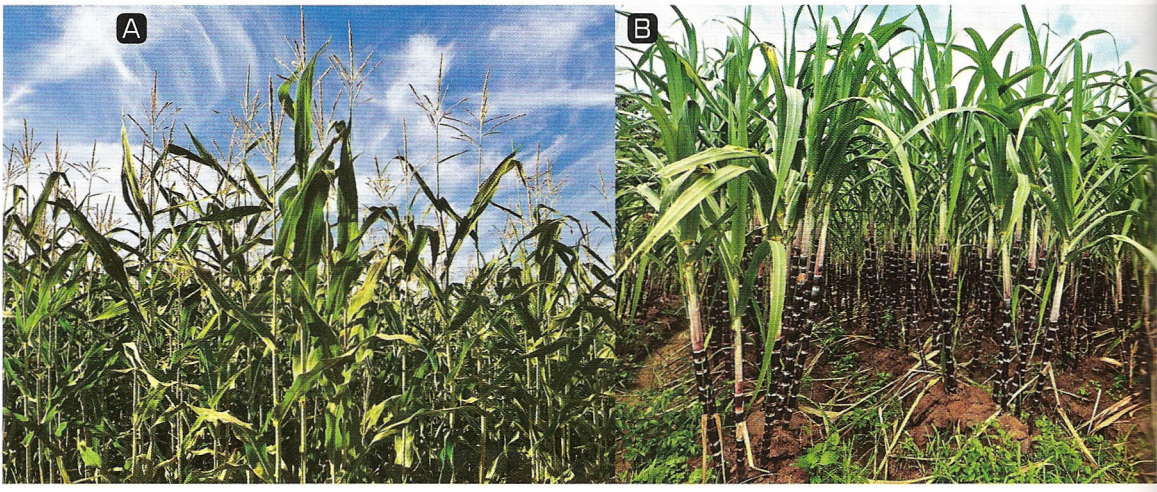
fosfoenolopirogronian

16.3. Kwas szczawiooctowy – pierwszy produkt asymilacji CO_2 u roślin przeprowadzających fotosyntezę typu C_4 i CAM (na zielono zaznaczono dołączony dwutlenek węgla)

rek mezofilu. Skutkuje to znacznym ograniczeniem **fotooddychania**, co zwiększa wydajność fotosyntezy. Rozwiązanie to ma jednak również wadę. Wiązanie dwutlenku węgla u roślin C_4 oraz transport jabłaczanu i pirogronianu pomiędzy komórkami mezofilu a miękiszem wieńcowym wiążą się z wydatkiem energii. Na jedną przeniesioną cząsteczkę dwutlenku węgla konieczne jest zużycie dwóch cząsteczek ATP. Do przeniesienia sześciu cząsteczek CO_2 (potrzebnych do utworzenia jednej cząsteczki glukozy) konieczne jest zatem zużycie 12 cząsteczek ATP. Łączna reakcja cyklu Calvina u roślin typu C_4, z uwzględnieniem kosztów transportu dwutlenku węgla, przedstawia się więc następująco:

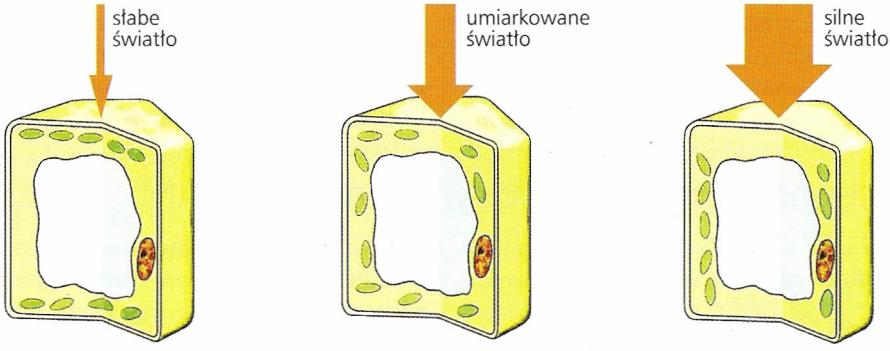
$$6\ CO_2 + 30\ ATP + 12\ \ NADPH + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 30\ ADP + 30\ Pi + 12\ NADP^+$$

W fotosyntezie typu C_3, w cyklu Calvina zużywanych było tylko 18 cząsteczek ATP. Oznacza to, że fotosynteza C_4 jest znacznie bardziej energochłonna – do wytworzenia w jej trakcie cząsteczki **glukozy** potrzeba blisko dwukrotnie więcej ATP. Jednak nasilenie fotooddychania wywołane dobrymi warunkami do fotosyntezy i postępującym zużyciem dwutlenku węgla spowodowałoby znacznie wyższe straty. To okoliczność szczególnie ważna dla roślin żyjących w gorącym klimacie. Fotosynteza typu C_4 jest dla nich znacznie korzystniejsza energetycznie, usprawnia ich metabolizm, a dodatkowo zmniejsza zużycie wody. Jednak gdy sprawność i tempo fotosyntezy są stosunkowo niskie na skutek warunków środowiska (np. niskiej temperatury), to – przy równoczesnym odpowiednim stężeniu dwutlenku węgla w powietrzu – korzystniejsza jest fotosynteza typu **C_3**. Dlatego fotosynteza typu **C_4** występuje głównie w strefach tropikalnych, skąd pochodzą przeprowadzające ją rośliny ważne dla gospodarki człowieka, takie jak kukurydza i trzcina cukrowa **(16.4.)**.



16.4. Kukurydza (A) i trzcina cukrowa (B) są jednymi z najczęściej uprawianych roślin typu C_4.

Intensywność światła

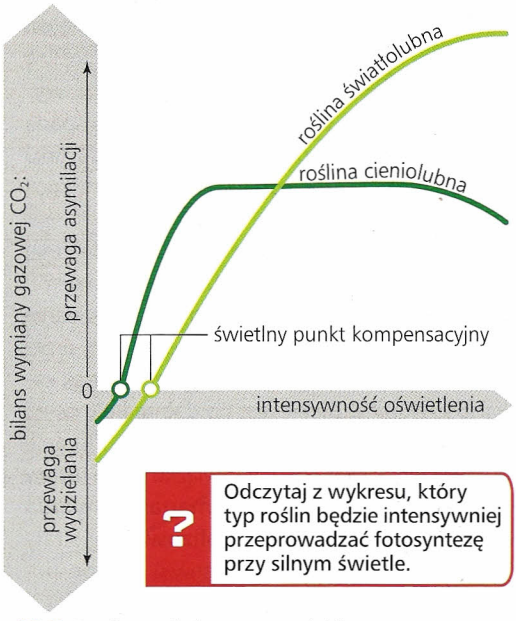


16.5. Zmiana ułożenia chloroplastów w komórkach w zależności od ilości docierającego do nich światła

? Określ, jak zmiana ułożenia chloroplastów wpływa na ilość padającego na nie światła.

Stężenie dwutlenku węgla wpływa na efektywność fazy ciemnej fotosyntezy, natomiast procesy zachodzące w **fazie jasnej** zależą od dostępu do światła. Intensywność oświetlenia, a więc liczba **fotonów** docierających do rośliny, ma podstawowe znaczenie w szybkości produkcji **ATP** i **NADPH**, czyli siły asymilacyjnej. Gdy światła jest zbyt mało, fotosynteza praktycznie ustaje, wciąż zachodzi jednak oddychanie rośliny – zatem pochłania ona tlen, a wydziela dwutlenek węgla. Z kolei im intensywniejsze oświetlenie, tym większa intensywność fotosyntezy. Ilość światła, przy której **oddychanie** i **fotosynteza** się równoważą, nazywamy **świetlnym punktem kompensacyjnym**. Powyżej niego fotosynteza przeważa nad oddychaniem, a jej intensywność dalej rośnie. Dzieje się tak tylko do pewnego momentu. Gdy światło jest zbyt intensywne, może dojść do obniżenia wydajności fotosyntezy w związku z uszkadzaniem przez nie **fotosystemów**. Rośliny bronią się przed tym, zmieniając ustawienie liści tak, aby padało na nie mniej światła. Również **chloroplasty** (16.5.) przemieszczają się we wnętrzu komórki tak, by pochłaniać mniej fotonów. Odwrotna sytuacja zachodzi dla małej intensywności światła – zarówno liście, jak i chloroplasty w komórkach liścia ustawiają się tak, by wyłapać go jak najwięcej.

Optymalne natężenie światła jest różne dla różnych gatunków roślin. W związku z tym wyróżnia się **rośliny światłolubne** i **cieniolubne**. U roślin cieniolubnych liście są cieńsze, występują nieco inne proporcje barwników, znacznie większe są też **anteny energetyczne** odpowiedzialne za wyłapywanie światła (tzn. liście zawierają więcej chlorofilu). Ich świetlny punkt kompensacyjny przypada na niższe (16.6.) natężenie światła, ale też przy niższych wartościach dochodzi do wysycenia światłem. Rośliny takie są w związku z tym wrażliwsze na uszkodzenia spowodowane nadmiernym oświetleniem.



? Odczytaj z wykresu, który typ roślin będzie intensywniej przeprowadzać fotosyntezę przy silnym świetle.

16.6. Porównanie intensywności fotosyntezy u roślin cieniolubnych i światłolubnych

Oprócz intensywności światła bardzo ważne jest też, gdzie przypada **maksimum absorpcji** aparatu fotosyntetycznego rośliny. Zależy ono od gatunku, a w jeszcze większym stopniu od grupy, do jakiej należy organizm fotosyntetyzu-

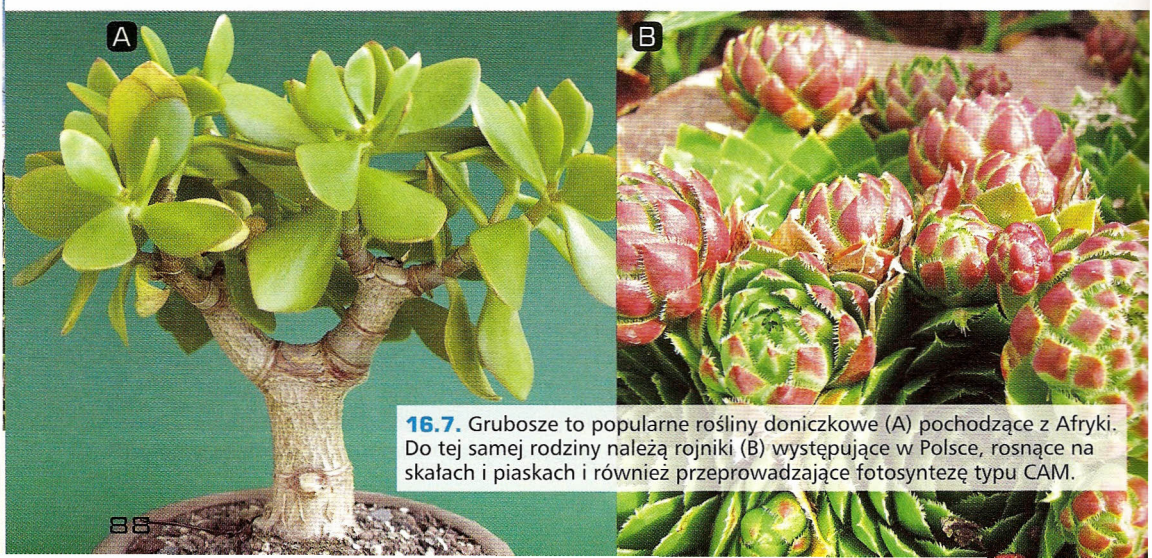
jący. Wszystkie barwniki fotosyntetyczne są wrażliwe na światło widzialne, ale różna jest długość **fali świetlnej**, przy której pochłaniają najwięcej energii. Odmienny skład barwników umożliwia więc fotosyntezę w różnych warunkach. Dzięki temu należące do glonów krasnorosty mogą występować na dużych głębokościach, na których intensywność światła jest za mała dla zielenic i roślin wyższych. Mogą wykorzystywać **zakres światła** (przede wszystkim promienie niebieskie i zielone), który przenika na tę głębokość w ilości wystarczającej dla ich rozwoju.

Dostępność wody. Fotosynteza typu CAM

Woda okazuje się bardzo istotna na wszystkich etapach fotosyntezy. W **fazie jasnej** jest wykorzystywana jako źródło elektronów i protonów H^+. Z kolei w **fazie ciemnej** jest zużywana w hydrolizie podczas fazy karboksylacji. Odpowiednie uwodnienie komórki staje się też konieczne dla prawidłowego przebiegu reszty jej metabolizmu. Przy niskim uwodnieniu komórek szparkowych szparki liści zamykają się w celu ochrony rośliny przed utratą wody. Uniemożliwia to jednak **wymianę gazową**, w wyniku czego szybko spada ilość dwutlenku węgla. O skutkach, jakie taka sytuacja ma dla przebiegu fotosyntezy, już wspominano.

Kluczowe znaczenie ma więc odpowiednia gospodarka wodna rośliny. Dzięki efektywnemu **pobieraniu** i **transportowi wody** odpowiednia jej ilość zostaje dostarczona do organów przeprowadzających fotosyntezę. Czasem jednak zawartość wody w glebie jest bardzo mała (np. na terenach pustynnych), co uniemożliwia pobranie jej w wystarczającej ilości. W związku z tym rośliny wykorzystują różne sposoby **magazynowania** wody, starają się też **minimalizować** jej straty (np. związane z wymianą gazową). Z tego powodu u wielu roślin rosnących w klimacie suchym wykształcił się mechanizm określany jako **fotosynteza typu CAM** (z ang. *crassulacean acid metabolism* – metabolizm kwasowy gruboszowatych). Nazwa ta pochodzi od jednej z grup roślin, u których ten typ fotosyntezy występuje, czyli rodziny gruboszowatych (*Crassulaceae*) **(16.7.)**.

W fotosyntezie typu CAM następuje czasowe rozdzielenie wiązania dwutlenku węgla i włączania go do cyklu Calvina. Ogólne zasady są podobne do fotosyntezy typu C_4. Dwutlenek węgla przyłączany jest do fosfoenolopirogronianu, wskutek czego powstaje szczawiooctan, a następnie jabłczan (czyli odpowiednio – kwas szczawiooctowy i jabłkowy). Jednak w przeciwieństwie do fotosyntezy C_4, w fotosyntezie CAM wiązanie dwutlenku węgla odbywa się w nocy. Aparaty szparkowe są wtedy otwarte i roślina prowadzi intensywną wymianę gazową. Nie może jednak od razu wykorzystać dwutlenku węgla, ponieważ nie zachodzi **faza jasna** i nie tworzy się **siła asymilacyjna**. Dlatego powstały wcześniej jabłczan jest magazynowany w **wakuoli** i w dzień, kiedy zachodzi właściwa fotosynteza, służy do wytworzenia dwutlenku węgla. Komórki prowa-



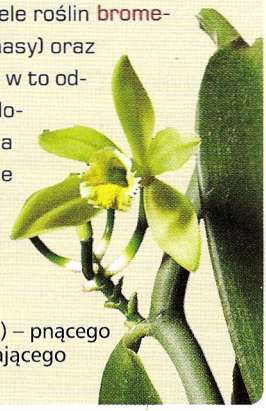
16.7. Grubosze to popularne rośliny doniczkowe (A) pochodzące z Afryki. Do tej samej rodziny należą rojniki (B) występujące w Polsce, rosnące na skałach i piaskach i również przeprowadzające fotosyntezę typu CAM.

dzące fotosyntezę mogą wówczas korzystać tylko z tego źródła CO_2, ponieważ aparaty szparkowe są zamknięte. W ciągu dnia temperatura jest wysoka, a wilgotność powietrza bardzo niska, więc prowadzenie wtedy wymiany gazowej wiązałoby się z dużymi stratami wody. W nocy niższa temperatura i wyższa wilgotność pozwalają te straty ograniczyć.

Wadą fotosyntezy typu CAM są jeszcze większe koszty wiązania dwutlenku węgla niż w fotosyntezie C_4. Jednak dla roślin rosnących w miejscach, w których duża intensywność światła i wysokie temperatury przyczyniają się do znacznej intensywności fotosyntezy, koszty energetyczne mają mniejsze znaczenie niż braki wody. Dlatego oprócz gruboszowatych, do których należą rosnące w Polsce rozchodniki i rojniki, ten typ fotosyntezy prowadzi wiele innych roślin pustynnych, w tym kaktusy.

:: Ciekawostka

Fotosynteza typu CAM występuje nie tylko u roślin pustynnych. Jest też często spotykana u roślin nadrzewnych (epifitów), które również muszą ograniczać zużycie wody. Do grupy tej należy wiele roślin bromeliowatych (w tym ananasy) oraz storczyków (włączając w to odmiany uprawiane w doniczkach). Fotosynteza typu CAM występuje też u storczyka nie będącego epifitem – wanilii.

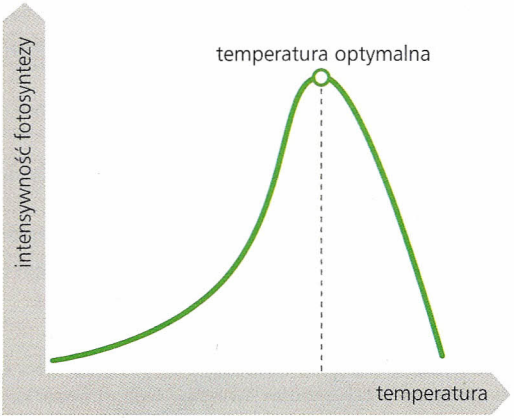


Kwiat wanilii (*Vanilla* sp.) – pnącego storczyka przeprowadzającego fotosyntezę typu CAM

Temperatura

Podobnie jak w przypadku ilości światła, intensywność fotosyntezy rośnie wraz ze wzrostem temperatury **(16.8.)**. Wynika to przede wszystkim z aktywności enzymów – w niższych temperaturach ich działanie jest mniej wydajne. Dotyczy to zarówno enzymów biorących udział w fotosyntezie, jak i uczestniczących w powiązanych z nią reakcjach (które np. dostarczają substratów do właściwych reakcji fotosyntezy). Dlatego między innymi fotosynteza C_4 nie występuje w strefach chłodnych – przy niewielkiej intensywności **fazy jasnej** większy koszt energetyczny wiązania dwutlenku węgla ma dla rośliny duże znaczenie. Zresztą w chłodnym klimacie rzadko występują niedobory dwutlenku węgla, ponieważ rośliny zwykle rosną tam mniej bujnie niż w tropikach i nie zużywają go aż tyle.

Jednak zbyt wysoka temperatura, podobnie jak nadmierna ilość światła, powoduje spadek wydajności fotosyntezy. Za ten stan rzeczy odpowiedzialne są enzymy – w wysokich temperaturach dochodzi do ich **dezaktywacji**, a w skrajnych przypadkach nawet do **denaturacji**. Wzrost temperatury zmniejsza też powinowactwo rubisco do dwutlenku węgla, a tym samym przyspiesza **fotooddychanie** (kolejny powód przewagi roślin typu C_4 w klimacie gorącym!). Zbyt wysoka temperatura ma zatem jeszcze większy wpływ na wydajność fotosyntezy niż zbyt intensywne światło.



16.8. Zależność intensywności fotosyntezy od temperatury

Rośliny starają się regulować temperaturę podobnie jak ilość docierającego do nich światła – za pomocą odpowiedniego ułożenia liści. W przypadku zbyt wysokiej temperatury możliwe jest też otwarcie **szparek** i chłodzenie tkanek dzięki **odparowywaniu wody**, co przypomina pocenie się ssaków. Takie rozwiązanie jest jednak możliwe tylko wtedy, gdy roślina ma dostęp do odpowiedniej ilości wody.

Oprócz opisanych wyżej głównych czynników wpływających na intensywność fotosyntezy znaczenie ma także wiele innych. Wydajność tego procesu może znacznie zmniejszyć na przykład brak niektórych pierwiastków, jak **magnezu** będącego składnikiem chlorofilu czy **manganu** biorącego udział w fotolizie wody. Istotny jest również fakt, że czynniki wpływające na przebieg fotosyntezy nie działają niezależnie (np. ilość dwutlenku węgla i możliwość regulacji temperatury zależy w dużej mierze od dostępności wody). Może to ograniczać zdolność rośliny do przeciwdziałania niekorzystnym warunkom. Często niedobór (lub nadmiar) jednego czynnika powoduje zahamowanie całego procesu. Jest to przykład działania **zasady tolerancji ekologicznej** (która zostanie szerzej omówiona na kolejnych etapach nauki).

:: Doświadczenie

Wpływ czynników zewnętrznych na intensywność fotosyntezy

Materiały: zlewka o pojemności przynajmniej 400 ml (w wariancie doświadczenia – 3 zlewki), bagietka szklana, odcięty pęd moczarki (długości ok. 10 cm), źródło światła o dużej mocy (200–500 W), sekundnik, woda (najlepiej gazowana, z której przestał się wydzielać dwutlenek węgla)
Uwaga: w wariancie doświadczenia konieczne jest podgrzanie i schłodzenie wody. Najlepiej, gdy podczas doświadczenia dostęp światła z zewnątrz jest jak najmniejszy, a jedynym źródłem światła jest przygotowane sztuczne oświetlenie o dużej mocy.

Wykonanie:

1. Pęd moczarki przywiązać do bagietki i umieścić w zlewce wypełnionej wodą tak, by łodyga była skierowana przeciętym końcem w górę. Wyznaczyć trzy miejsca w różnej odległości od źródła światła (np. co 50 cm).
2. W każdym z nich przez określony czas (np. 1 minutę) mierzyć liczbę pęcherzyków gazu wydzielanego przez moczarkę.
3. Po przestawieniu moczarki na inne miejsce należy każdorazowo odczekać około 2 minut przed rozpoczęciem pomiaru.
4. Wskazane jest kilkakrotne powtórzenie pomiarów i obliczenie średniej liczby pęcherzyków wydzielonych przez roślinę w każdym miejscu.

Wariant doświadczenia:
Przygotować 3 zlewki z wodą (o temp. 5°C, 20°C i 35°C). Ustawić je w odległości 30 centymetrów od źródła światła. Pęd moczarki przywiązać do szklanej bagietki podobnie jak w poprzedniej wersji doświadczenia. Bagietkę zanurzać kolejno w zlewkach i liczyć pęcherzyki gazu wydzielone przez roślinę w określonym czasie (np. w ciągu 1 minuty). Przed wykonaniem nowego pomiaru należy odczekać około 2 minut. Podobnie jak w poprzednim wariancie doświadczenia wskazane jest kilkakrotne wykonanie pomiarów i obliczenie średniej dla każdej temperatury wody.

Wyniki: Intensywność wydzielania pęcherzyków tlenu przez roślinę zależny zarówno od intensywności oświetlenia, jak i temperatury.

Wnioski: Przy wyższej temperaturze i intensywniejszym świetle rośnie intensywność fotosyntezy, której efektem jest wydzielenie pęcherzyków z tlenem.

PODSUMOWANIE

- Intensywność fotosyntezy jest ograniczana przez rozmaite czynniki środowiska. Rośliny starają się temu przeciwdziałać na różne sposoby.
- Niedobór dwutlenku węgla skutkuje nasileniem niekorzystnego energetycznie zjawiska zwanego fotooddychaniem. Rośliny typu C_4 oddzielają przestrzennie wiązanie dwutlenku węgla od cyklu Calvina, w wyniku czego zwiększają stężenie CO_2 w komórkach pochwy okołowiązkowej.
- Przy zbyt niskim natężeniu światła roślina oddycha intensywniej, niż przeprowadza fotosyntezę. Im silniejsze światło, tym intensywniejsza fotosynteza, jednak tylko do pewnej wartości progowej. Powyżej niej może dojść do uszkodzenia aparatu fotosyntetycznego.
- Niedobór wody uniemożliwia fotosyntezę. Rośliny przeprowadzające fotosyntezę typu CAM oszczędzają wodę, wiążąc dwutlenek węgla w nocy i wykorzystując go w dzień (przy zamkniętych aparatach szparkowych).
- Fotosynteza zachodzi tym szybciej, im wyższa jest temperatura. Jednak zbyt wysoka temperatura prowadzi do uszkodzenia enzymów, co uniemożliwia fotosyntezę.
- Oprócz światła, temperatury, wody i dwutlenku węgla wiele innych czynników wpływa na intensywność fotosyntezy (np. niedobory pewnych pierwiastków).

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego zbyt wysokie natężenie światła lub zbyt wysoka temperatura powodują spadek intensywności fotosyntezy.
2. Wyjaśnij, dlaczego rośliny przeprowadzają fotosyntezę typu C_4 i CAM, mimo że są one bardziej kosztowne energetycznie.
3. Podaj powody, dla których fotosynteza typu C_4 jest bardziej rozpowszechniona w klimacie gorącym.
4. Wyjaśnij, dlaczego przy dużej dostępności wody roślinie w mniejszym stopniu grozi przegrzanie i brak dwutlenku węgla.

BIBLIOGRAFIA

- Szweykowska A, Szweykowski J., *Botanika*, t. I i II, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- Wojtaszek P., Woźny A., Ratajczak L. 2008, *Biologia komórki roślinnej*, t. I i II, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.



17. Chemosynteza

Chemosynteza polega na tworzeniu związków organicznych z dwutlenku węgla przy udziale energii pochodzącej z utleniania prostych związków nieorganicznych i organicznych. W przeciwieństwie do fotosyntezy, w większości ekosystemów chemosynteza ma niewielkie znaczenie w produkcji biomasy, czyli materii organicznej. Proces ten stanowi jednak ważne ogniwo w obiegu pierwiastków w przyrodzie.

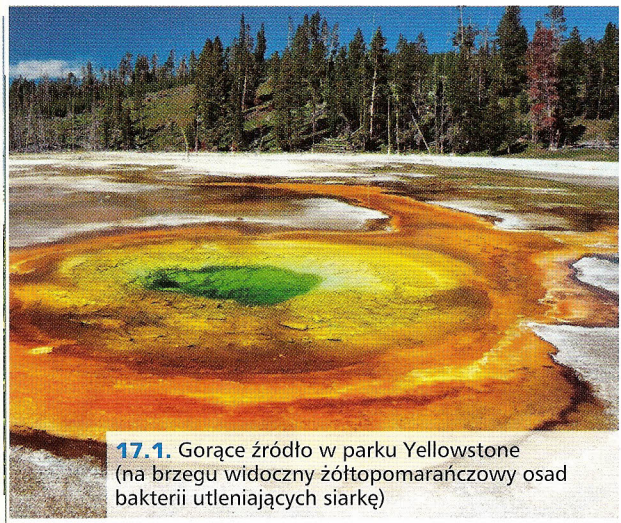
Ogólna charakterystyka chemosyntezy

Chemosynteza przebiega w sposób zbliżony do fotosyntezy. Dwutlenek węgla jest pobierany przez organizm, który wbudowuje go do związków organicznych. Energia potrzebna do przeprowadzenia tej reakcji pochodzi jednak nie ze światła, a z utleniania prostych związków chemicznych, takich jak **siarkowodór** lub **metan**. Chemosynteza jest więc znacznie prostsza niż fotosynteza, gdyż nie wymaga skomplikowanych mechanizmów wyłapywania fotonów światła i przekształcania ich energii na energię chemiczną (jak barwniki fotosyntetyczne i fotosystemy).

Energia wykorzystywana przez **chemoautotrofy** jest dostępna w **formie chemicznej** i może być użyta bezpośrednio do **syntezy ATP**. Z drugiej strony substraty chemosyntezy są zwykle stosunkowo mało dostępne w środowisku. Ich energia jest też zdecydowanie mniejsza niż wykorzystywana przez fotoautotrofy energia promieniowania słonecznego. Ogranicza to rozwój, a więc i rozmiary organizmów przeprowadzających chemosyntezę, dlatego nie ma wśród nich form wielokomórkowych – wszystkie chemoautotrofy to **bakterie**.

Rodzaje chemosyntezy

Mimo że jej ogólny mechanizm jest prosty, chemosynteza to bardzo zróżnicowany proces. **Bakterie chemosyntetyzujące** mogą wykorzystywać jako źródło energii zarówno związki nieorganiczne, jak i proste, jednowęglowe związki organiczne.



17.1. Gorące źródło w parku Yellowstone (na brzegu widoczny żółtopomarańczowy osad bakterii utleniających siarkę)

Jedną z najważniejszych grup chemoautotrofów są **bakterie siarkowe**, które przy udziale tlenu utleniają siarkowodór do kwasu siarkowego (inaczej niż fotosyntetyzujące bakterie siarkowe, które wykorzystują siarkowodór jako źródło elektronów i jonów wodoru, a energię czerpią ze światła słonecznego). Reakcja utleniania siarkowodoru dostarcza ilość energii porównywalną z energią czterech moli kwantów światła. Można ją zapisać następująco:

$$H_2S + 2\ O_2 \rightarrow 2\ H^+ + SO_4^{2-}$$

W przeciwieństwie do fotosyntetyzujących bakterii siarkowych, bakterie siarkowe przeprowadzające chemosyntezę mogą wykorzystać inne związki siarki, a także **siarkę pierwiastkową**:

$$S^0 + H_2O + 1\ ½\ O_2 \rightarrow 2\ H^+ + SO_4^{2-}$$

Reakcja ta dostarcza również dość dużo energii, jednak mniej niż utlenianie siarkowodoru.

Jak widać, obie reakcje powodują powstanie kwasu siarkowego, co prowadzi do znacznego zakwaszenia środowiska **(17.1.)**.

Z kolei **bakterie wodorowe** utleniają wodór, wykorzystując do tego różne związki chemiczne, w tym tlen. W efekcie powstaje woda i wydziela się pewna ilość energii, jednak znacznie niższa niż w chemosyntezie przeprowadzanej przez bakterie siarkowe. Przebieg tej reakcji można zapisać w następujący sposób:

$$H_2 + ½\ O_2 \rightarrow H_2O$$

Bardzo ważną grupą chemoautotrofów są **bakterie nitryfikacyjne**, utleniające związki azotu. Zwykle są to reakcje wieloetapowe, a każdy etap przeprowadza inny gatunek bakterii. Pierwsza faza przemian polega na utlenieniu amoniaku do jonów azotanowych(III), co można zapisać następująco:

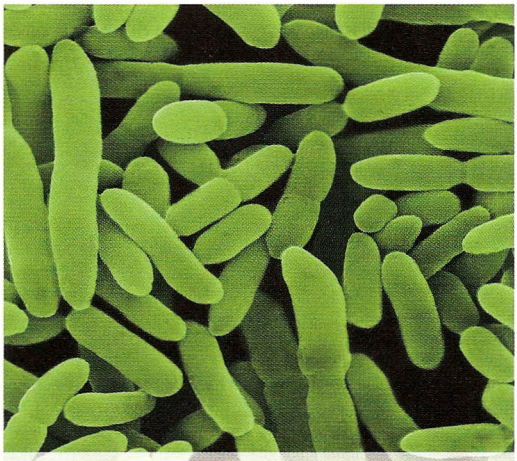
$$NH_3 + 1½\ O_2 \rightarrow NO_2^- + H^+ + H_2O$$

Dostarcza to ilość energii porównywalną z wyzwalaną podczas utleniania wodoru. Najbardziej znanym spośród kilku rodzajów bakterii przeprowadzających te reakcje jest *Nitrosomonas* **(17.2.)**.

Od jonów azotanowych(III) uzależnione są z kolei utleniające je bakterie z rodzaju *Nitrobacter*, dlatego oba rodzaje bakterii zwykle występują wspólnie. *Nitrobacter* utlenia jony azotanowe(III) do jonów azotanowych(V) zgodnie z reakcją:

$$NO_2^- + ½\ O_2 \rightarrow NO_3^-$$

Ilość energii wyzwolonej w tej reakcji jest niewielka, dlatego rozwój tych bakterii jest niezbyt szybki. W związku z tym, mimo przetwarzania dużej ilości związków azotu, tworzą one niewiele materii organicznej. Ich znaczenie w ekosystemach polega jednak głównie na udostępnianiu azotu innym organizmom. **Amoniak**, będący produktem przemian azotowych u roślin i zwierząt, w większych ilościach jest niezwykle toksyczny. Wchodzący w jego skład azot jest jednak bardzo potrzebny (m.in. do tworzenia nowych aminokwasów). Proces utleniania prowadzony przez bakterie nitryfikacyjne przekształca azot do postaci lepiej przyswajalnej dla roślin (chociaż mogą one pobierać również amoniak). Bakterie te ograniczają też gromadzenie się związków azotu w glebie. Przeprowadzane przez nie przemiany są w związku z tym istotnym elementem geochemicznego **cyklu azotu**, jednego z najważniejszych cykli składających się na **obieg materii** w przyrodzie (temat obiegu materii, jako zagadnienie z zakresu ekologii, zostanie szerzej omówiony w III tomie podręcznika).



17.2. Bakterie z rodzaju *Nitrosomonas* utleniające amoniak do azotynów

Ciekawą grupą organizmów chemosyntetyzujących są **bakterie żelaziste**. Utleniają one jony żelazowe(II) do jonów żelazowych(III) zgodnie z reakcją:

$$4\ FeCO_3 + O_2 + 6\ H_2O \rightarrow 4\ Fe(OH)_3 + 4\ CO_2$$

Jony żelazowe(II) występują w przyrodzie tylko w środowiskach kwaśnych, więc tylko w takich warunkach mogą bytować bakterie żelaziste. Reakcja utleniania jonów żelazowych(II) dostarcza mało energii (znacznie mniej niż utlenianie jonów azotanowych(III)), dlatego bakterie żelazowe muszą do produkcji ATP wykorzystywać różnicę stężenia protonów między bardzo kwaśnym otoczeniem a wnętrzem komórki. Protony H^+ (decydujące o kwasowości środowiska) trafiają w efekcie do komórki, gdzie łączą się z elektronami pochodzącymi z żelaza i po połączniu z tlenem, jako woda, są usuwane na zewnątrz. Dzięki temu utrzymuje się różnica odczynów pomiędzy wnętrzem bakterii a środowiskiem.

Wszystkie opisane wyżej bakterie należą do tak zwanych **chemolitotrofów**. Oznacza to, że wykorzystują energię z utleniania związków nieorganicznych. Jednak istnieją też organizmy wykorzystujące podczas chemosyntezy proste związki organiczne. To tak zwane **chemoorganotrofy**. Ich najważniejszą grupą są **metylotrofy**, utleniające związki jednowęglowe – przede wszystkim metan. W efekcie powstaje dwutlenek węgla.

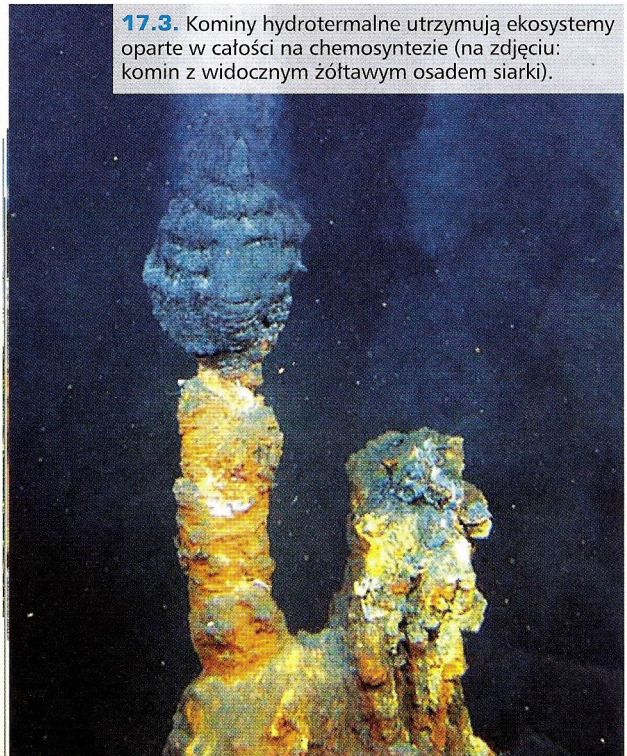
Proces ten dostarcza stosunkowo dużo energii (w ilości porównywalnej z utlenianiem siarkowodoru). Metylotrofy, z pewnymi wyjątkami, nie są jednak zdolne do wykorzystywania dwutlenku węgla jako źródła węgla, więc zwykle nie są uznawane za organizmy w pełni **autotroficzne**.

Bilans i znaczenie chemosyntezy

Ilość energii uwalniana podczas utleniania związków chemicznych w trakcie chemosyntezy jest bardzo różna. Sposoby jej wykorzystania również są zróżnicowane. U części bakterii chemosyntetyzujących, przede wszystkim siarkowych i wodorowych, występuje typowy **cykl Calvina**, w którym jest wiązany dwutlenek węgla i powstają związki organiczne. Gdy jednak proste związki organiczne są dostępne w środowisku, bakterie wykorzystują je jako źródło węgla, co pozwala im zaoszczędzić energię. Natomiast u części bakterii w ogóle nie dochodzi do wiązania CO_2, trudno zatem określić je jako organizmy autotroficzne (chemosynteza jest dla nich jedynie dodatkowym źródłem energii).

Duża zdolność adaptacji, swoiste metody wytwarzania energii oraz skrajne warunki, w jakich występują bakterie chemoautotroficzne, wskazują, że są to organizmy, które powstały we wczesnych etapach rozwoju życia na Ziemi. Były one w stanie wykorzystywać zarówno proste związki organiczne, jak i zredukowane związki nieorganiczne, obficie występujące w środowisku pozbawionym tlenu. Obecnie rola organizmów chemosyntetyzujących w produkcji materii organicznej jest bardzo mała. Nawet w całkowicie pozbawionych światła głębinach morskich większość materii organicznej została pierwotnie wytworzona przez organizmy fotosyntetyzujące – są to obumarłe szczątki roślin i zwierząt opadłe na dno. Podobnie zwierzęta i grzyby żyjące w jaskiniach korzystają z materii organicznej pochodzącej z powierzchni ziemi (np. przynoszonej przez nietoperze). Nie do przecenienia jest natomiast rola bakterii chemosyntetyzujących w **obiegu pierwiastków** w przyrodzie. Najważniejszą rolę odgrywają oczywiście bakterie nitryfikacyjne, ale także pozostałe grupy chemoautotrofów mają duże znaczenie.

Są jednak miejsca, w których bakterie chemosyntetyzujące stanowią podstawę **ekosystemów**. Nie dociera tam światło, za to obficie występują związki nieorganiczne, które mogą zostać wykorzystane w chemosyntezie (dotyczy to zwłaszcza **związków siarki**, dostarczających stosunkowo dużo energii). Pod pewnymi względami przypomina to warunki panujące na Ziemi przed miliardami lat – zanim w atmosferze pojawił się tlen. Takimi miejscami są między innymi szczeliny skalne w głębi Ziemi, a także **kominy hydrotermalne** (17.3.), z których wydobywa się woda ogrzana przez podmorskie wulkany. Woda ta jest wysycona siarkowodorem, okazuje się więc doskonałym miejscem do rozwoju bakterii siarkowych. W pobliżu kominów hydrotermalnych wykształcają się unikalne ekosystemy, całkowicie niezależne od światła słonecznego. W takich warunkach, korzystając z produktów wytworzonych przez symbiotyczne bakterie chemosyntetyzujące, występują należące do wieloszczetów rurkoczułkowce, ale też kraby i inne zwierzęta.

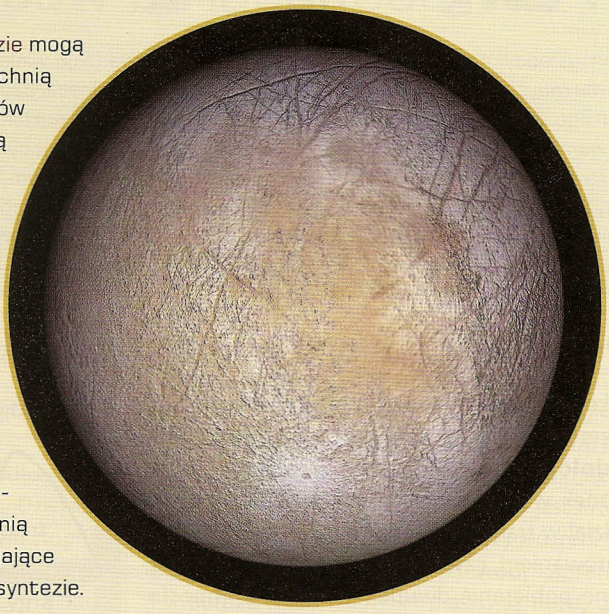


17.3. Kominy hydrotermalne utrzymują ekosystemy oparte w całości na chemosyntezie (na zdjęciu: komin z widocznym żółtawym osadem siarki).

? Dlaczego obfite zasoby siarki są na dużych głębokościach lepszym źródłem energii niż światło słoneczne?
Jak na odczyn wody w swoim pobliżu wpływają kominy hydrotermalne i żyjące w nich organizmy?

:: Ciekawostka

Ekosystemy oparte na chemosyntezie mogą występować głęboko pod powierzchnią ziemi. Są one odizolowane od warunków panujących na powierzchni, mogą więc służyć jako schronienie dla organizmów żywych, gdyby środowisko okazało się dla nich nieprzyjazne. Bardzo prawdopodobne, że w takich miejscach zostanie odkryte życie w kosmosie. Największe nadzieje wiąże się z planetami, na których (jak na księżycu Jowisza – Europie) podejrzewa się istnienie kominów hydrotermalnych, podobnych do występujących na Ziemi. Pod pokrytą lodem powierzchnią Europy mogą istnieć warunki sprzyjające rozwojowi życia opartego na chemosyntezie.



Europa – księżyc Jowisza. Pod jej pokrytą lodem powierzchnią mogą istnieć warunki sprzyjające rozwojowi życia opartego na chemosyntezie.

PODSUMOWANIE

- Chemosynteza polega na tworzeniu (bez udziału światła) związków organicznych z wykorzystaniem energii pochodzącej z utleniania związków nieorganicznych lub bardzo prostych związków organicznych.
- Chemoautotrofy to wyłącznie organizmy prokariotyczne.
- Chemosynteza ma niewielkie znaczenie w produkcji materii organicznej w większości ekosystemów, jest jednak niezwykle istotna w obiegu pierwiastków w przyrodzie.
- Wśród organizmów chemosyntetyzujących najważniejsze są bakterie siarkowe, utleniające siarkowodór i wolną siarkę, oraz bakterie nitryfikacyjne, utleniające amoniak do jonów azotanowych(III) i jonów azotanowych(V).

ZADANIA

1. Sporządź tabelę, w której porównasz substraty i produkty występujące w różnych typach chemosyntezy.
2. Wyjaśnij, dlaczego obecnie chemosynteza nie ma dużego znaczenia w produkcji materii organicznej.
3. Uzasadnij, dlaczego ekosystemy oparte na chemosyntezie są najbardziej prawdopodobnym miejscem do odnalezienia życia poza Ziemią.
4. Wiedząc, że jony azotanowe(V) mogą zostać w odpowiednich warunkach przekształcone w wolny azot uwalniany do atmosfery, uzasadnij rolę bakterii nitryfikacyjnych w oczyszczaniu wody z nadmiaru związków azotowych.

BIBLIOGRAFIA

- Kunicki-Goldfinger W., *Życie bakterii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008.

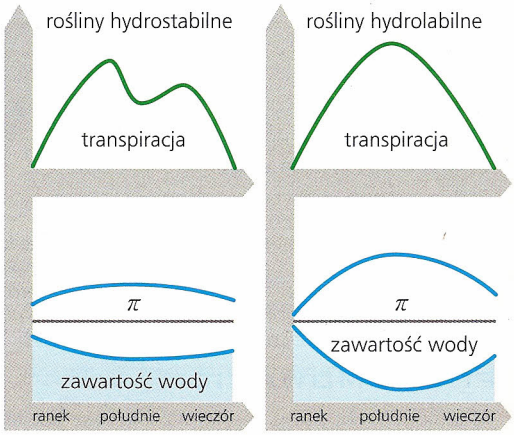
18. Gospodarka wodna roślin

Oprócz oddychania i fotosyntezy rośliny przeprowadzają wiele innych procesów metabolicznych, powiązanych ze sobą. Ich substraty muszą zostać dostarczone do konkretnych tkanek i organów, dlatego woda, która bierze udział we wszystkich tych reakcjach, odgrywa istotną rolę w funkcjonowaniu roślin. Odpowiada ona również za ich kształt i ruchy. W związku z tym wykształciły one sprawne mechanizmy **pobierania** i **transportu wody**, o czym najlepiej świadczy przykład drzew. Szybko i skutecznie przesyłają one wodę z korzeni położonych pod ziemią do liści znajdujących się nawet kilkadziesiąt metrów nad powierzchnią gruntu, a ich wydatki energetyczne z tym związane są zwykle minimalne.

Podstawy gospodarki wodnej rośliny

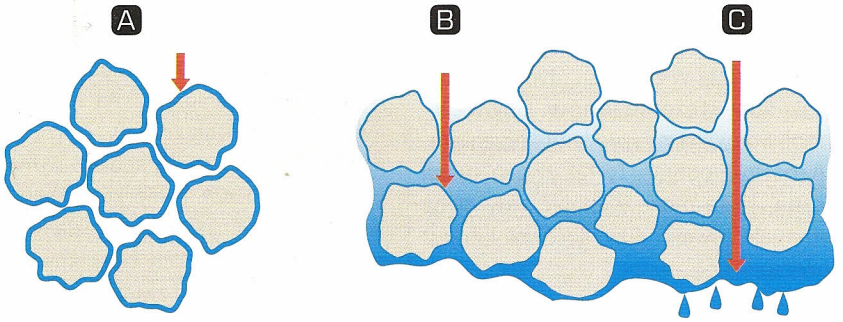
Jako uniwersalny rozpuszczalnik woda jest elementem łączącym podstawowe **procesy fizjologiczne** rośliny, odpowiada też (obok tkanek wzmacniających) za jej kształt. Bierze udział w transporcie różnych związków, a z jej parowaniem, czyli transpiracją, jest ściśle związane pobieranie dwutlenku węgla z atmosfery. Zapewnienie odpowiedniej ilości wody ma więc dla roślin kluczowe znaczenie, ponieważ w razie jej niedoboru więdną i stosunkowo szybko giną.

W zależności od typu gospodarki wodnej wyróżnia się dwa rodzaje organizmów autotroficznych (w tym także spoza królestwa roślin). Pierwszy jest uzależniony od ilości wody w otoczeniu. Gdy jest jej niewiele, organizm należący do tej grupy wysycha (ale nie ginie), a jego procesy metaboliczne ulegają ograniczeniu. Natomiast gdy ponownie uzyska on dostęp do wody, pobiera ją i normalnie funkcjonuje. Organizmy takie są zatem odporne nawet na długotrwałe okresy suszy, a należą do nich glony, porosty i mszaki. Druga grupa obejmuje większość roślin: od paprotników, poprzez nagozalążkowe, aż po okrytozalążkowe. Ich komórki zawierają centralnie położoną, dużą **wakuolę**, która umożliwia regulację uwodnienia komórki. Gdy straty wody są zbyt duże, dochodzi do **plazmolizy** i śmierci komórki. Aby temu zapobiegać, rośliny wykształciły mechanizmy chroniące je przed utratą wody i zapewniające jej efektywne pobieranie i transport. Dzięki temu są w znacznie mniejszym stopniu narażone na niekorzystne skutki wahań ilości wody w środowisku i mogą stale prowadzić aktywny metabolizm. Adaptacja ta pozwala im na opanowanie prawie wszystkich środowisk lądowych Ziemi.



18.1. Porównanie transpiracji, wartości ciśnienia osmotycznego (π) i zawartości wody w organizmach hydrostabilnych i hydrolabilnych w ciągu dnia

Organizmy fotosyntetyzujące można też podzielić pod względem szybkości ich reakcji na zmiany wilgotności. Organizmy **hydrolabilne** reagują na te zmiany wolno lub wcale. Do grupy tej zalicza się glony, porosty i mszaki, gdyż nie mają one wydajnych mechanizmów zabezpieczających przed intensywnym wysychaniem. Należy tu także część zielnych roślin okrytozalążkowych, których **aparaty szparkowe** stosunkowo wolno reagują na utratę wody. Prowadzi to do znacznego wahania całkowitej ilości wody w komórkach **(18.1.)** i do odwodnienia rośliny w godzinach południowych. Nigdy jednak nie dochodzi do całkowitego jej wyschnięcia, gdyż spowodowałoby to jej śmierć. Z kolei rośliny **hydrostabilne** bardzo szybko reagują na utratę wody, zamykając szparki. Powoduje to znaczne ograniczenie transpiracji i oddychania w porze dnia o najwyższej temperaturze. Rośliny takie często gromadzą w tkankach zapasy wody.



18.2. Rodzaje wody w glebie: higroskopijna (A), kapilarna (B) i grawitacyjna (C)

Do grupy tej należą drzewa, rośliny rosnące w miejscach zacienionych oraz sukulenty.

Gleba to dla roślin podstawowe źródło wody, która jednak nie w całości jest dostępna. Dzieje się tak, ponieważ woda może być w różnym stopniu związana z cząsteczkami gleby **(18.2.)**. W związku z tym wyróżnia się **wodę grawitacyjną**, która swobodnie przepływa w głąb gleby zgodnie z grawitacją (nie jest związana z cząsteczkami gleby), zaabsorbowaną przez cząsteczki gleby **wodę higroskopijną** oraz **wodę kapilarną**, która utrzymuje się w wąskich kanalikach między cząsteczkami gleby. Tylko ta ostatnia jest łatwo dostępna dla roślin. Jej ilość zależy od rodzaju gleby – w glebach piaszczystych wody kapilarnej jest bardzo mało (ziarenka piasku są duże, dlatego nieliczne są wąskie kanaliki między nimi), w glebach gliniastych jest jej znacznie więcej.

Potencjał wody

Mechanizm pobierania wody jest podobny u niemal wszystkich roślin. Do zrozumienia go konieczne jest wprowadzenie pojęcia **potencjału wody**. Określa on energię wody w roztworze, a zapisuje się go za pomocą greckiej litery Ψ (**psi**), często z dodatkowym oznaczeniem $_W$. Jego wartość podaje się w **paskalach** (Pa), ponieważ jest pojęciem blisko związanym z **ciśnieniem hydrostatycznym**. Nie da się go bezpośrednio zmierzyć, gdyż jego wartość jest wynikiem porównania roztworu badanego z czystą wodą przy normalnym ciśnieniu atmosferycznym (której potencjał równa się 0). Potencjał wody roztworów zawierających oprócz wody inne substancje (np. jony i związki chemiczne) ma zwykle wartość ujemną. Im więcej rozpuszczonych substancji, tym niższy potencjał wody (mniej wody w roztworze). Wpływ, jaki wywierają one na roztwór, to tak zwane **ciśnienie osmotyczne**. Z kolei im wyższe **ciśnienie hydrostatyczne** (czyli ciśnienie wywierane przez słup wody), tym wyższy potencjał wody (która jest bardziej „ściśnięta"). Bardzo ważny jest fakt, że **osmoza** zawsze odbywa się z roztworu o wyższym **potencjale wody** do roztworu mającego niższy potencjał. W praktyce oznacza to, że woda przenika z roztworu mniej stężonego do bardziej stężonego, ale zostaje przy tym uwzględnione ciśnienie hydrostatyczne. Odpowiednio wysokie ciśnienie hydrostatyczne może bowiem zrównoważyć potencjały wody roztworów o różnym stężeniu i zatrzymać osmozę. Potencjał wody można zatem w uproszczeniu określić jako różnicę pomiędzy ciśnieniem hydrostatycznym i potencjałem osmotycznym:

$$\Psi_W = \Psi_P - \Psi_\pi$$

Ψ_W – potencjał wody
Ψ_P – ciśnienie hydrostatyczne
Ψ_π – potencjał osmotyczny

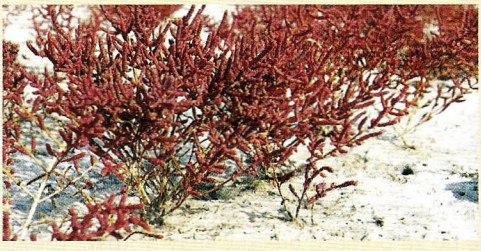
Różnice w potencjale wody mają duże znaczenie dla gospodarki wodnej roślin, ponieważ wymuszają bierny proces: pobieranie i transport wody. Nie istnieją specjalne przenośniki transportujące wodę do komórek, ponieważ **błony komórkowe** są dla niej przepuszczalne. Gdyby nawet została ona wtłoczona do komórki, natychmiast wypłynęłaby na skutek osmozy. Roślina

musi więc mieć niższy potencjał wody niż roztwór glebowy, co umożliwia wnikanie wody do korzeni. Komórki roślin muszą w związku z tym zawierać odpowiednio duże **stężenie jonów**. Gdy w glebie potencjał wody jest niższy niż w korzeniach, roślina nie może jej pobrać. To tak zwana **susza fizjologiczna**, która może wystąpić, gdy gleba jest wilgotna, ale zawiera dużą ilość soli lub jest przenawożona.

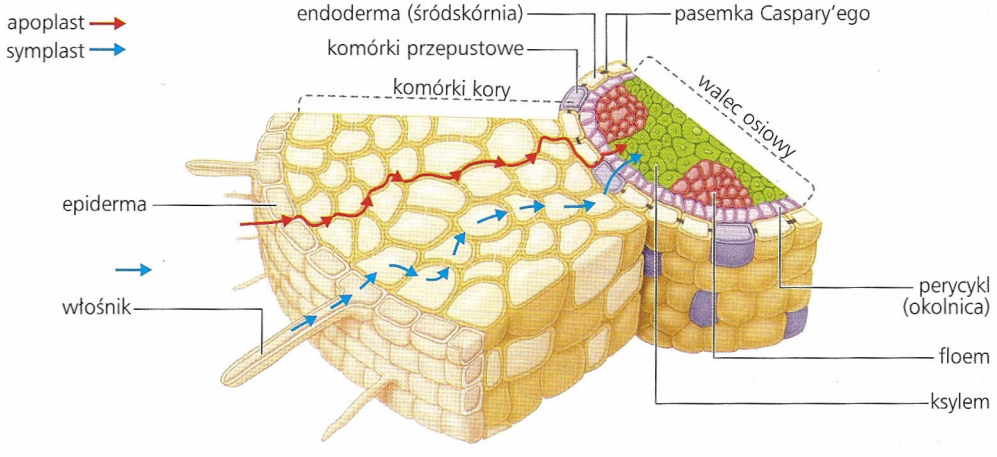
Różne części korzenia są wyspecjalizowane w pełnieniu określonych funkcji – za pobieranie wody odpowiedzialna jest strefa włośnikowa. Włośniki to delikatne cienkościenne wypustki komórek skórki, które znacznie zwiększają powierzchnię korzenia i usprawniają pobieranie wody. Pozbawione ich starsze części korzenia praktycznie nie są w stanie jej pobierać. Po wniknięciu przez włośniki woda przemieszcza się w korzeniu dwiema możliwymi drogami: przenika przez przestrzenie międzykomórkowe i ściany komórkowe (jest to tzw. **apoplast**) lub płynie we wnętrzu komórek połączonych **plazmodesmami** (tzw. **symplast**). Barierę w transporcie (zwłaszcza apoplastowym) stanowi śródskórnia (endoderma) **(18.3.)**, której ściany komórkowe są skorkowaciałe i nieprzepuszczalne dla wody. W związku z tym w endodermie przemieszcza się ona jedynie żywymi komórkami przepustowymi. Zjawisko to służy przynajmniej częściowemu oddzieleniu wody w walcu osiowym od kory pierwotnej.

:: Ciekawostka

Halofity to rośliny rosnące w miejscach o dużym zasoleniu (np. na brzegach mórz i w pobliżu słonych źródeł). Z problemem suszy fizjologicznej radzą sobie w różny sposób. Bywa, że ich sok komórkowy zawiera dużo soli, której nadmiar jest wydzielany przez specjalne gruczoły. Rośliny te gromadzą również drobnocząsteczkowe związki organiczne, takie jak sorbitol i cukry proste. Obniżają w ten sposób własny potencjał wody w stosunku do potencjału roztworu glebowego, co umożliwia pobieranie wody. Halofity spotyka się czasem na poboczach dróg, które zimą są posypywane solą. Jej nagromadzenie w glebie utrudnia wzrost innych roślin. Przykładami roślin żyjących w miejscach o dużym zasoleniu i występujących również w Polsce są soliród zielny (*Salicornia europaea*) i trawa mannica odstająca (*Puccinellia distans*), która często rośnie przy drogach posypywanych solą.



Soliród zielny (*Salicornia europaea*)

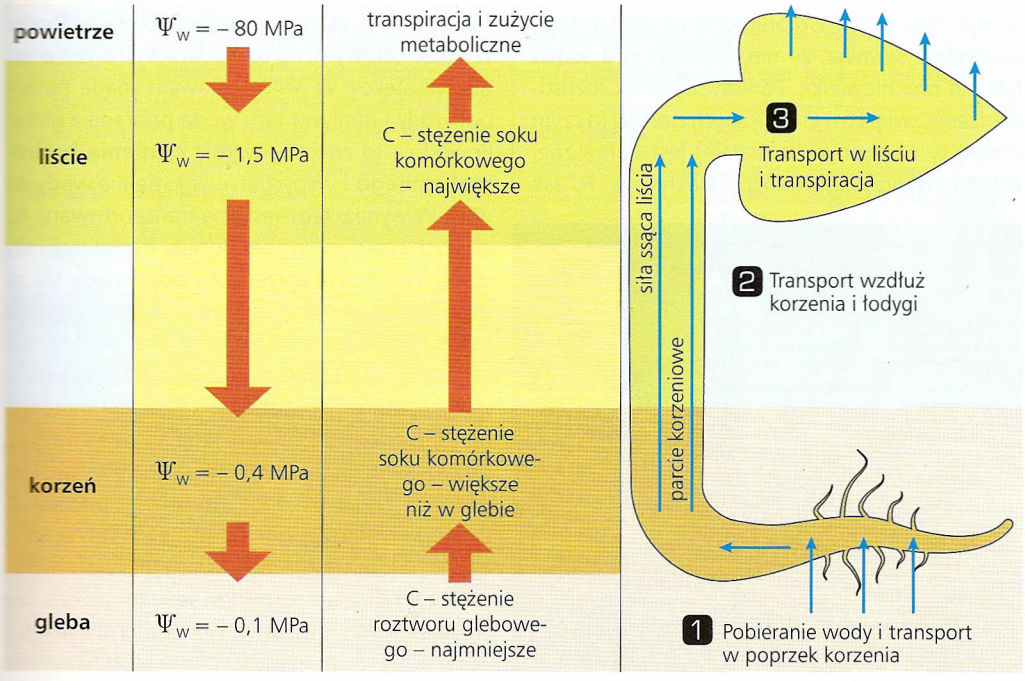


18.3. Transport wody z włośników do walca osiowego korzenia; linią ciągłą zaznaczono transport apoplastowy, strzałki przerywane oznaczają transport symplastowy.

Transpiracja i transport wody w ksylemie

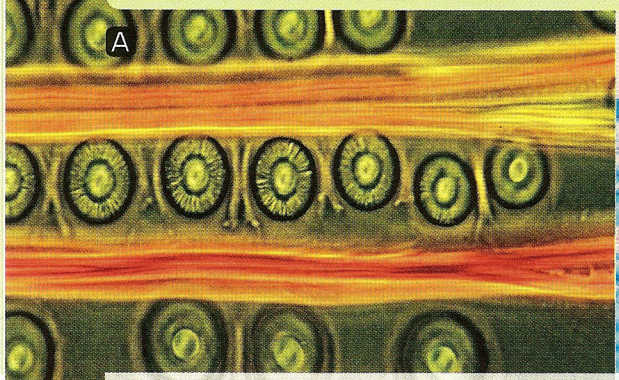
Bierny proces, jakim jest **osmoza**, wystarcza do transportu wody w korzeniu. Jednak w przypadku znacznie oddalonych liści, które tracą najwięcej wody, byłby on zbyt wolny. Dlatego woda jest transportowana do liści w inny sposób – za pośrednictwem drewna (ksylemu). Od sprawności mechanizmu wymuszającego ruch wody w ksylemie zależy całość metabolizmu rośliny. Jest to proces pasywny, niewymagający dostarczania energii, co stanowi dla rośliny ogromną oszczędność. Bardzo istotną rolę odgrywa w nim zjawisko **transpiracji**, która polega na parowaniu wody z części roślin mających kontakt z atmosferą. Największe znaczenie ma **transpiracja szparkowa**. Zachodzi ona w przestworach międzykomórkowych rośliny, z których para wodna wydostaje się na zewnątrz za pośrednictwem aparatów szparkowych. Znacznie mniejszy udział w procesie parowania wody, zwłaszcza u roślin żyjących w klimacie suchym, ma **transpiracja kutykularna**. Odbywa się ona na powierzchni skórki pokrytej grubą warstwą wosku (kutykulą), która służy zminimalizowaniu strat wody. Marginalne znaczenie ma natomiast **transpiracja przetchlinkowa**, która zachodzi w przetchlinkach, czyli luźnych fragmentach korkowicy, zapewniających wymianę gazową w starszych częściach roślin.

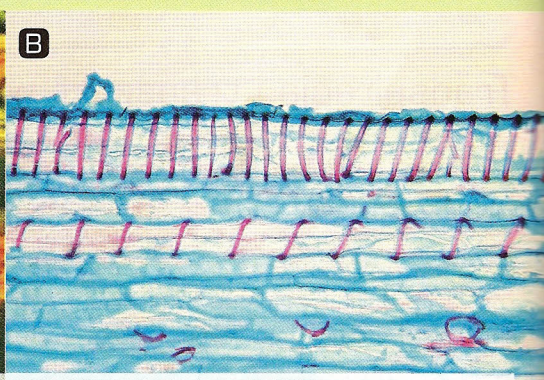
Ubytek wody z komórek liści na skutek transpiracji powoduje obniżenie **potencjału wody**. W wyniku tego woda jest pobierana z sąsiednich komórek, a następnie z ksylemu. To z kolei sprawia, że w ksylemie powstaje **podciśnienie**, które zasysa wodę z korzeni. Jest to tak zwana **siła ssąca liści**, która odpowiada za transport wody z korzeni do wyżej położonych organów rośliny (**18.4.**). Podciśnienie to jest tak duże, że umożliwia bardzo szybkie przesyłanie wody na znaczne odległości (np. na wysokość 100 m). Sprawne działanie tego mechanizmu nie byłoby możliwe, gdyby nie właściwości wody (omówiono je w poprzedniej części podręcznika). Jedną z nich jest **kohezja**, czyli siła spójności, która przeciwdziała przerwaniu słupa wody – mimo



18.4. Schemat pobierania i transportu wody w roślinie (Ψ_w – potencjał wody)

? Określ różnice w potencjale wody między glebą, częściami rośliny i powietrzem.



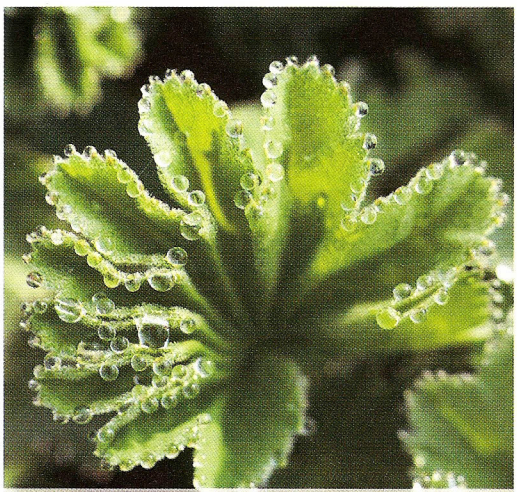


18.5. Cewki (A) i naczynia (B) ksylemu; widoczne prążkowanie naczyń to wzmocnienia ścian podłużnych (nie dzielą one naczynia na odcinki).

jego dużej wysokości – pod wpływem ciężaru. Również **adhezja** (siła przylegania) cząsteczek wody do ścian naczynia wspomaga tworzenie jednolitego słupa wody. Analizując transport wody w roślinie, należy również wziąć pod uwagę budowę ksylemu. Pozbawione ścian poprzecznych **naczynia** są znacznie efektywniejsze w przewodzeniu wody niż **cewki** nagonasiennych **(18.5.)**. Płynąc naczyniami, woda nie napotyka na swej drodze przeszkód, co usprawnia transport i cały metabolizm rośliny (i sprzyja np. szybszemu wzrostowi). Jest to jedna z przyczyn dużego sukcesu ewolucyjnego roślin okrytonasiennych.

Parcie korzeniowe

Opisany wyżej bierny transport wody jest utrudniony, gdy roślina traci liście (np. w okresie jesienno-zimowym). Ograniczone na skutek tego parowanie sprawia, że nie powstaje **siła ssąca** lub jest ona niewielka. Ponieważ jednak rozprowadzenie związków chemicznych i jonów (o czym więcej w następnym rozdziale) jest konieczne, roślina wykorzystuje transport aktywny. To tak zwane **parcie korzeniowe**, które wymaga dostarczenia energii i zachodzi niezależnie od pory roku. Roślina aktywnie podnosi stężenie jonów w walcu osiowym, na co wydatkowana jest energia. W efekcie w walcu osiowym spada potencjał wody i napływa tam woda pobrana z gleby. Powoduje to znaczny wzrost **ciśnienia hydrostatycznego** i wypychanie w ksylemie wody do góry. W wyniku tego jest ona transportowana do górnych części rośliny bez udziału transpiracji i siły ssącej liści. Parcie korzeniowe odpowiada też za dwa inne zjawiska. Pierwsze z nich to **gutacja (18.6.)**, czyli wydzielanie nadmiaru wody przez liście w postaci kropli. Widać to zwłaszcza wtedy, gdy wilgotność powietrza jest wysoka, ponieważ przy mniejszym parowaniu krople wody dłużej się utrzymują. Czasem omyłkowo uznaje się gutację za rosę, czyli parę wodną skropioną z powietrza. Parcie korzeniowe powoduje też wypływ soku z uszkodzonej gałęzi lub pnia – mówi się wówczas, że roślina „płacze". Jest to częste zwłaszcza wiosną, gdy z powodu ograniczonej transpiracji (liście dopiero się rozwijają) parcie korzeniowe jest najsilniejsze i odpowiada za większość transportu w roślinie. Zjawisko to wykorzystuje się przy pozyskiwaniu tzw. soku brzozowego.



18.6. Gutacja na liściach przywrotnika (*Alchemilla* sp.)

PODSUMOWANIE

- Większość roślin precyzyjnie reguluje swoją gospodarkę wodną, dzięki czemu mogą zasiedlać różne, nawet bardzo suche środowiska.
- Wodę w glebie dzielimy na grawitacyjną, higroskopijną i kapilarną. Tylko woda kapilarna jest łatwo dostępna dla roślin.
- Potencjał wody Ψ określa energię wody w roztworze (dla czystej wody ma wartość 0). Substancje rozpuszczone w wodzie obniżają jej potencjał, a wyższe ciśnienie hydrostatyczne go zwiększa.
- Osmoza zawsze odbywa się z roztworu o wyższym potencjale wody do roztworu o niższym potencjale.
- Jeśli potencjał wody w korzeniach jest wyższy niż potencjał roztworu glebowego, woda nie może być przez roślinę pobrana. Występuje wówczas zjawisko suszy fizjologicznej.
- Po pobraniu przez włośniki korzeniowe woda przemieszcza się przez symplast lub apoplast do walca osiowego.
- Woda w ksylemie przemieszcza się dzięki sile ssącej liści, która jest wynikiem transpiracji odbywającej się przede wszystkim poprzez aparaty szparkowe.
- Transport wody jest możliwy dzięki siłom adhezji i kohezji, które zapewniają ciągłość słupa wody w tkankach przewodzących.
- Gdy z powodu małej transpiracji siła ssąca liści słabnie, transport wody jest wymuszany przez parcie korzeniowe, które wymaga dostarczenia energii potrzebnej do przeniesienia jonów.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego brak wydatków energetycznych na transport wody jest dla rośliny dużą oszczędnością. Uwzględnij zapotrzebowanie rośliny na wodę.
2. Objaśnij, czym jest potencjał wody i jakie znaczenie dla rośliny ma utrzymywanie go na odpowiednim poziomie.
3. Wyjaśnij, czym jest susza fizjologiczna i co może być jej przyczyną.
4. Sporządź tabelę, w której porównasz organizmy hydrostabilne i hydrolabilne (uwzględnij informacje zamieszczone na ryc. 18.1.).
5. Wyjaśnij, na czym polega mechanizm parcia korzeniowego.

BIBLIOGRAFIA

- Evans D. E., Lack A. J., *Biologia roślin*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.

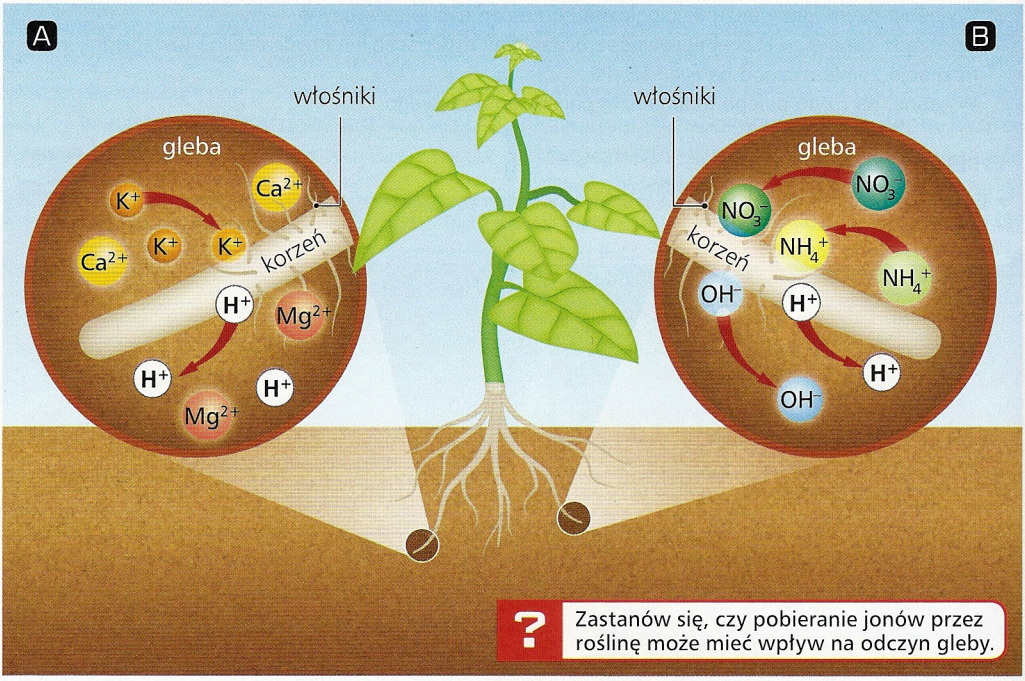
19. Gospodarka mineralna i transport substancji organicznych w roślinie

Pobieranie i **transport wody**, ściśle powiązane z wymianą gazową, mają dla rośliny podstawowe znaczenie. Jednak dla prawidłowego przebiegu jej metabolizmu niezbędnych jest także wiele substancji mineralnych, które za pomocą korzeni pobiera z gleby. Muszą one zostać sprawnie dostarczone do poszczególnych części rośliny. Dotyczy to także większości produktów fotosyntezy, zachodzącej głównie w liściach.

Pobieranie substancji mineralnych

Dwutlenek węgla i woda są dla rośliny źródłem podstawowych pierwiastków budujących związki organiczne: **węgla, wodoru** i **tlenu**. Potrzebuje ona jednak również **makroelementów**: azotu, potasu, wapnia, magnezu, fosforu i siarki, a także wielu **mikroelementów**. Ich podstawowym źródłem jest gleba, choć czasem sole mineralne (np. siarczany i amoniak) są pobierane przez liście. Pierwiastki występują w glebie w postaci jonów – rozpuszczonych w wodzie i dobrze przyswajalnych. W przeciwieństwie do wody, są one selektywnie pobierane przez korzenie za pomocą **białek przenośnikowych**. Oznacza to, że roślina czerpie z gleby tylko te jony, których potrzebuje. To proces aktywny, czyli wymaga wydatku energii w postaci **ATP**. W błonach komórek korzeni występują również **kanały jonowe**, umożliwiające selektywne przenikanie jonów na zasadzie prostej **dyfuzji**, bez wydatkowania energii.

Mikro- i makroelementy mogą występować również w formie związanej, w której są dla



19.1. Wymiana jonowa w korzeniach rośliny na przykładzie kationów potasu (A) oraz związków azotu (B)

rośliny trudno przyswajalne (jak np. nierozpuszczalny fosforan wapnia). Poza tym pierwiastki o podobnych właściwościach konkurują w przyłączaniu się do białek przenośnikowych (np. duża zawartość sodu utrudnia pobieranie potasu, a nadmiar wapnia – pobieranie magnezu). Oprócz współwystępujących pierwiastków, na przyswajalność makro- i mikroelementów duży wpływ ma **odczyn gleby** (**pH**), którego wartości nie powinny być ani zbyt wysokie, ani zbyt niskie. Większość pierwiastków jest trudno dostępnych dla roślin w środowiskach silnie kwaśnych (przy pH poniżej 5), a na przykład żelazo – w glebach o odczynie silnie zasadowym.

Podczas pobierania przez roślinę soli mineralnych duże znaczenie ma zachowanie równowagi ładunków. Błona komórkowa korzenia jest zwykle naładowana ujemnie, co sprzyja przyciąganiu do niej i pobieraniu **kationów**, takich jak: K^+, Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} lub NH_4^+. Jednak aby zachować ten ładunek, na każdy pochłonięty kation konieczne jest wydalenie innego – najczęściej protonu H^+. Przy pobieraniu pierwiastków występujących w postaci **anionów**, takich jak SO_4^{2-}, $H_2PO_4^-$ oraz NO_3^-, wydzielane są aniony HCO_3^- lub OH^-. Proces ten określany jest jako **wymiana jonowa** (19.1.).

Rola organizmów symbiotycznych

Pobieranie soli mineralnych i wody jest dodatkowo wspomagane przez **mikoryzę**, czyli symbiotyczny związek rośliny i grzyba. Strzępki grzyba otaczają korzenie rośliny, a nawet wnikają do ich środka. Dzięki temu znacznie zwiększają powierzchnię, którą wchłaniane są potrzebne roślinie substancje. W zamian za to dostarcza ona grzybowi związki organiczne (np. węglowodany).

Szczególną rolę w życiu roślin odgrywa **azot**. Jako składnik wszystkich aminokwasów jest makroelementem potrzebnym w największych ilościach – więcej potrzeba jedynie węgla, wodoru i tlenu. Głównym źródłem azotu jest atmosfera, w której występuje on powszechnie, jednak w formie cząsteczkowej (N_2), całkowicie niedostępnej dla roślin. Rozwiązaniem tego problemu okazuje się symbioza z bakteriami wiążącymi azot. Najbardziej znanym przykładem takiego związku są rośliny motylkowate (np. fasola, koniczyna, łubin), które w brodawkach korzeniowych zawierają bakterie *Rhizobium*. Bakterie te wiążą obecny w powietrzu azot, w wyniku czego powstaje **amoniak**. To bardzo skomplikowany, a przy tym kosztowny energetycznie proces (utlenianie amoniaku podczas chemosyntezy wyzwalało dużo energii, a zatem związanie azotu w amoniak wymaga jej dostarczenia w podobnej ilości). Roślina przekazuje bakteriom brodawkowym związki organiczne, które są przez nie wykorzystywane jako źródło energii. W zamian uzyskuje dostęp do łatwo przyswajalnego azotu, który jest na tyle ważnym pierwiastkiem, że mimo wysokich kosztów energetycznych symbioza okazuje się dla niej korzystna.

Transport soli mineralnych w roślinie

Transport soli mineralnych jest ściśle związany z transportem wody, w której są rozpuszczone. Podobnie jak ona mogą być w korzeniu transportowane przez **symplast** lub **apoplast** i także w ich przypadku dużą barierą okazuje się śródskórnia (endoderma). Jony są przez nią aktywnie przemieszczane, co powoduje powstanie parcia korzeniowego. Dostają się w ten sposób do ksylemu (choć pewne znaczenie w transporcie jonów ma również floem) i są wraz z wodą rozprowadzane po całej roślinie. Dostarczanie jonów to jedna z funkcji **parcia korzeniowego**. Jest ono jedynym sposobem transportu wody z solami mineralnymi do organów, które dopiero się rozwijają i nie przeprowadzają intensywnej **transpiracji** (jak np. pąki liściowe lub kwiatowe).

Transport jonów ma dla rośliny bardzo duże znaczenie, ponieważ dostarczane dzięki niemu sole mineralne wpływają na **potencjał wody**, co umożliwia sterowanie ruchem płynów. W odróżnieniu od transportu wody, przebiegającego zawsze zgodnie z różnicą potencjału wody, transport jonów to proces aktywny, wymagający dostaw energii. Roślina zużywa jej w tym celu bardzo dużo – szacuje się, że w korzeniach intensywnie rosnących roślin jedna trzecia produkowanego **ATP** jest wykorzystywana właśnie na pobieranie i transport jonów!

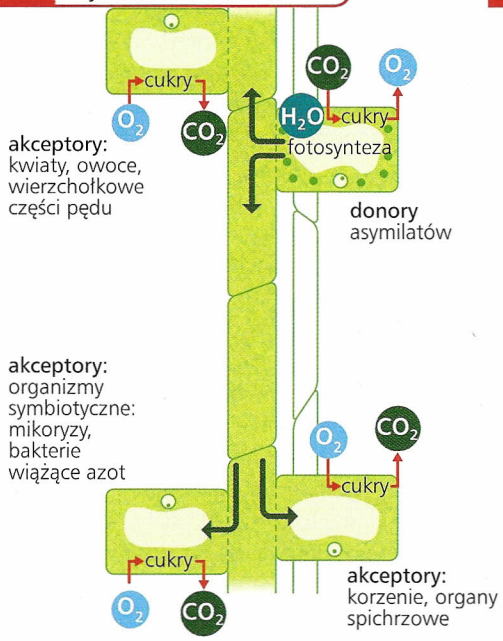
Transport substancji organicznych w roślinie

Substancje organiczne (w tym produkty **fotosyntezy**) są transportowane w odmienny sposób niż woda i sole mineralne. Służy do tego specjalna tkanka przewodząca – **floem** (łyko). Wszystkie asymilaty powstają w liściach i innych zielonych tkankach, ale mogą być transportowane zarówno w dół (do korzeni), jak i w górę (np. do dojrzewających owoców) **(19.2.)**. Substancje zapasowe pochodzące z liści są często magazynowane pod ziemią (np. w bulwach), ale żeby mogły zostać wykorzystane, są przesyłane z powrotem do łodygi i liści. Kierunek przewodzenia związków organicznych może się zatem zmieniać w ciągu roku.

Większość węglowodanów powstałych podczas fotosyntezy w komórkach liścia (jak glukoza lub skrobia) nie jest tam przechowywana zbyt długo. Przede wszystkim rozprowadzane są one do wszystkich komórek liścia i w sąsiedztwo drobnych **wiązek przewodzących** (skrobia – po zamianie na cukry proste). Odbywa się to, podobnie jak w przypadku wody i soli mineralnych, poprzez **apoplast** lub plazmodesmami w **symplaście**. Jest to transport aktywny i wymaga wydatkowania energii, jednak zachodzi zgodnie z **gradientem stężeń**. Natomiast tak zwany **załadunek floemu (19.3.)**, czyli transport substancji organicznych z komórek miękiszu do floemu (łyka), odbywa się wbrew gradientowi stężeń. To również transport aktywny, ale poza dostarczeniem dużej ilości energii wymaga dodatkowo odpowiednich przenośników. Wcześniej jednak węglowodany muszą zyskać postać nadającą się do transportu. Ani skrobia, której cząsteczki są zbyt duże, ani heksozy (niewielkie, ale bardzo reaktywne) nie są przesyłane. Transportowane są natomiast inne cukry (np. rafinoza) i alkohole (takie jak sorbitol i mannitol). Najczęściej jednak jest to **sacharoza**.

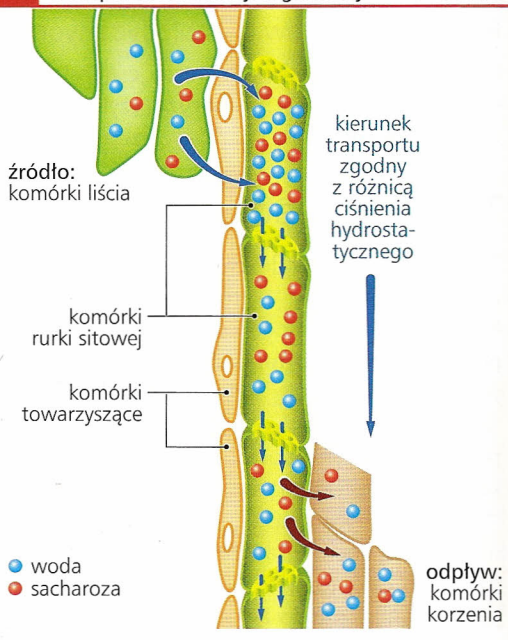
Wymienione związki poprzez floem docierają do organów docelowych, gdzie następuje proces określany jako rozładunek floemu, czyli transport związków organicznych z komórek floemu do miękiszu organu. To również transport aktywny, podobnie jak załadunek floemu. Jest jednak o tyle łatwiejszy, że odbywa się zgodnie z **gradientem stężeń** (w rurkach floemu jest więcej cukru niż w tkance docelowej). Po przeniesieniu z floemu do określonego organu sacharoza jest rozkładana

? Omów kierunki transportu asymilatów w roślinie.



19.2. Gospodarka substancjami organicznymi (asymilatami) w roślinie

? Wyjaśnij, jak przemieszcza się woda podczas transportu substancji organicznych we floemie.



19.3. Transport substancji organicznych we floemie

i powstałe w wyniku tego węglowodany są przez **symplast** lub **apoplast** transportowane do poszczególnych komórek. Wyjątek stanowią rośliny magazynujące sacharozę, takie jak burak cukrowy. W ich korzeniach jest ona transportowana prosto do komórek magazynujących.

Między miejscem załadunku i rozładunku floemu zachodzi **transport bierny**, niewymagający nakładu energii. Wykorzystywany jest do tego **potencjał wody**. W miejscu załadunku floemu roztwór, z powodu nagromadzenia substancji organicznych, jest bardzo stężony. W związku z tym ma wysokie **ciśnienie osmotyczne**, a więc niski potencjał wody. Powoduje to napływanie wody (tylko wody) z sąsiednich tkanek, głównie z ksylemu, w wyniku czego wzrasta potencjał wody i **ciśnienie hydrostatyczne**. Z kolei w miejscu **rozładunku** substancje organiczne są z floemu pobierane i potencjał wody rośnie. Woda jest w związku z tym oddawana z powrotem do ksylemu (choć już w innym miejscu). W efekcie **ciśnienie hydrostatyczne** spada. Różnica ciśnienia hydrostatycznego pomiędzy punktem załadunku i rozładunku jest tak duża, że powoduje ruch płynu wypełniającego floem – jest on zasysany w kierunku tkanki docelowej. Ruch ten może zachodzić w roślinie w różnych kierunkach, jednak zawsze od miejsca **załadunku** (źródła substancji organicznych) do punktu **rozładunku** (pobierającego te substancje). Nawet jeśli asymilaty przesyłane są równocześnie do organów znajdujących się w różnych częściach rośliny (np. do korzeni i owoców), w jednej rurce sitowej w danym momencie transport odbywa się tylko w jednym kierunku.

Szczegóły transportu substancji organicznych we floemie są wciąż słabo znane. Różnią się też znacznie pomiędzy grupami roślin, czego przykładem są nagozalążkowe, u których bardziej prymitywna budowa łyka utrudnia przepływ substancji organicznych. Transport asymilatów jest w związku z tym procesem, w którym wiele pozostało do zbadania.

PODSUMOWANIE

- Makro- i mikroelementy są aktywnie i selektywnie pobierane przez rośliny za pomocą białek przenośnikowych.
- Na intensywność pobierania jonów mają wpływ obecność innych jonów i odczyn gleby.
- Pobieranie soli mineralnych jest znacznie wspomagane przez układy symbiotyczne, w jakie wchodzą rośliny: mikoryzę i symbiozę z bakteriami wiążącymi azot.
- Sole mineralne są razem z wodą transportowane w ksylemie.
- Produkty fotosyntezy nigdy nie są transportowane w postaci skrobi i heksoz. Najczęściej wykorzystywana jest sacharoza.
- Pierwszym etapem transportu związków organicznych na duże odległości jest załadunek floemu, odbywający się wbrew gradientowi stężeń. Etap ten wymaga znacznego nakładu energii.
- Po załadunku asymilaty są biernie, pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego, transportowane do punktu docelowego.
- Rozładunek floemu jest procesem aktywnym i zachodzi zgodnie z gradientem stężeń.

ZADANIA

1. Wymień czynniki, które mogą wpływać na pobieranie jonów z gleby.
2. Wyjaśnij, jak na pobieranie wody i soli mineralnych wpływają układy symbiotyczne pomiędzy roślinami wyższymi a grzybami i bakteriami.
3. Opisz, w jaki sposób powstaje różnica ciśnień pomiędzy punktem załadunku i rozładunku floemu, i wyjaśnij jej funkcję.
4. Sporządź tabelę, w której porównasz transport wody i substancji organicznych (asymilatów) w roślinie. Uwzględnij takie cechy, jak kierunek transportu, tkanki za niego odpowiedzialne i nakład energii.

BIBLIOGRAFIA

- Dzierżyńska A., *Czy rośliny mogą „zjadać" rośliny, czyli o pasożytniczych roślinach nasiennych* [online], „Kosmos" 2007, nr 1–2. Dostępny w internecie: http://kosmos.icm.edu.pl/PDF/2007/133.pdf.

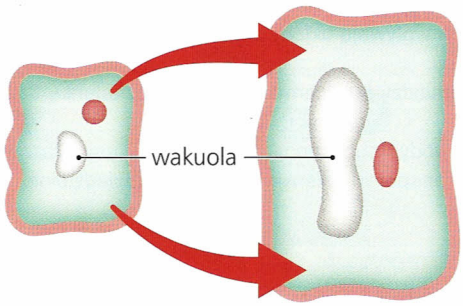
20. Ruchy roślin

Zdolność do ruchu to jedna z podstawowych właściwości organizmów żywych, różna może być jedynie skala ruchu. W przeciwieństwie do zwierząt rośliny zwykle uznawane są za organizmy nieruchome. Dzieje się tak, ponieważ przemieszczają one poszczególne organy, a nie całe ciało, poza tym zupełnie inny jest mechanizm ich ruchu. Okazuje się on jednak wystarczająco efektywny, by umożliwić reakcję rośliny na różne czynniki środowiska i usprawnić jej czynności życiowe, w tym fotosyntezę i rozmnażanie.

Podstawy ruchu roślin

Wspominano już o ruchach organów roślin, które dostosowywały się w ten sposób do zmieniających się warunków środowiska (np. ustawiając liście tak, aby pochłonąć odpowiednią ilość światła). Ruch ten jest możliwy dzięki zmianom w obrębie różnych tkanek, ponieważ u roślin nie występuje odpowiednik tkanki mięśniowej zwierząt. Odmienne niż u zwierząt są też właściwości tego ruchu, co wpływa na postrzeganie roślin jako organizmów całkowicie nieruchomych. Zwykle bowiem poruszają się one bardzo powoli i raczej na niewielkie odległości. W dodatku przemieszcza się nie cała roślina, ale jej **organy** (lub nawet tylko ich części) przesuwają się względem siebie.

Mięśnie zwierząt poruszają się dzięki działaniu kurczliwych białek, a ruch roślin opiera się w dużej mierze na zmianie ilości wody w komórkach. Zależy więc od jej dostępności i jest powiązany z **potencjałem wody**. Przy niedoborach wody możliwości regulacji kształtu i położenia ciała rośliny są ograniczone – stan ten określa się jako **więdnięcie**. Podczas ruchu woda może być wykorzystywana na dwa sposoby. Pierwszym jest zmiana **turgoru** komórki i wywołane nią **ruchy turgorowe** (prowadzące np. do zamykania i otwierania **aparatów szparkowych**). Ten typ odwracalnych ruchów jest bardzo częsty. Drugi sposób polega na tym, że woda wypełnia wakuolę, a wywierane przez nią ciśnienie powoduje rozciąganie komórki (**20.1.**) i – w efekcie – jej **wzrost wydłużeniowy** (elongacyjny). Jest on nieodwracalny, ponieważ podczas rozciągania komórki rozbudowie ulega jej ściana komórkowa. Nie może się ona z powrotem skurczyć, a więc rozmiar komórki też nie może się zmniejszyć. Aby wzrost wydłużeniowy skutkował ruchem rośliny, konieczne jest współdziałanie zespołów komórek. Gdy odbywa się on w różnych częściach organu z różną prędkością, może doprowadzić do zmiany ułożenia całej rośliny lub jej części. Są to tak zwane **ruchy wzrostowe** i mają bardzo duże znaczenie. Skorygowanie przesunięcia może nastąpić tylko w wyniku wzrostu młodszych komórek w nowych częściach organu.



20.1. Mechanizm wzrostu wydłużeniowego (elongacyjnego) komórek

Bardzo ważnym kryterium podziału ruchów roślin jest **typ bodźca**, na który są one reakcją. Mogą nim być **światło**, **grawitacja**, dostępność **wody**, ale też **dotyk**. Bodźce dzieli się na kierunkowe i bezkierunkowe. Do pierwszych należą światło i grawitacja, na które roślina reaguje ruchem w kierunku działania bodźca lub przeciwnym. Z kolei **bodźce bezkierunkowe** wpływają w równym stopniu na całą roślinę lub dużą jej część, a reakcja na nie nie przebiega w konkretnym kierunku. Przykładem może być odwodnienie, które działa dość równomiernie na cały organizm. Bodźce bezkierunkowe to dla rośliny ważne informacje (co ciekawe, może ona reagować w sposób nieukierunkowany również na bodźce kierunkowe).

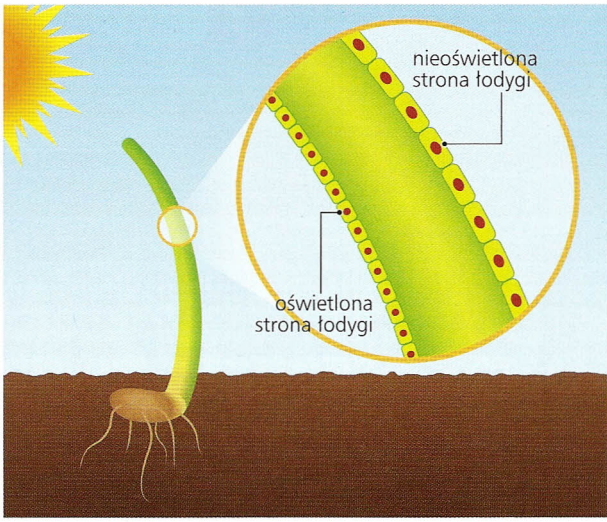
Tropizmy i taksje

Kierunkowe reakcje na bodźce dzieli się na tropizmy i taksje, a różnica między nimi polega na skali ruchu. **Taksja** to ruch całego organizmu. Jest on typowy dla organizmów jednokomórkowych, w tym glonów. U roślin osiągających duże rozmiary taksje zwykle nie występują lub są ograniczone do **komórek rozrodczych** (jak np. u paprotników i mszaków). U roślin nasiennych, w związku z rozmnażaniem pozbawionym swobodnie pływających gamet, nie występują w ogóle.

Najczęstszymi taksjami są **fototaksje**, czyli ruchy związane z kierunkiem działania światła, oraz **chemotaksje**, występujące pod wpływem gradientu stężenia substancji chemicznych. Te pierwsze spotykane są zwykle u jednokomórkowców **autotroficznych**, drugie – przede wszystkim u **heterotrofów** (pomagają w poszukiwaniu źródła pokarmu). Chemotaksje są też ważne w odnajdowaniu się komórek rozrodczych. W zależności od kierunku reakcji wyróżniamy taksje dodatnie, polegające na ruchu w stronę działania bodźca (np. w stronę mocniejszego światła lub substancji o wyższym stężeniu), oraz ujemne – skierowane przeciwnie niż bodziec kierunku (w stronę mniejszego stężenia substancji lub słabszego światła).

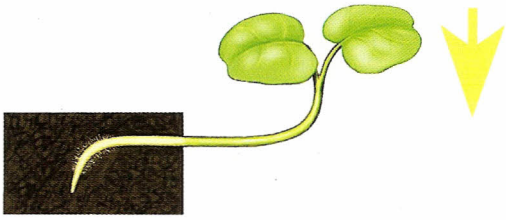
Podobnie jak taksje, **tropizmy** również mogą być dodatnie lub ujemne. Dotyczą jednak tylko pojedynczych organów, a nie całych organizmów. Jest to typowa forma ruchu u dużych roślin, bardzo ważna w ich dostosowywaniu się do środowiska. Tropizmy polegają przede wszystkim na ruchach wzrostowych, więc najaktywniej zachodzą w młodych częściach roślin. W zależności od typu bodźca wyróżniono wiele typów tropizmów, spośród których omówione zostaną najważniejsze.

Fototropizm to kierunkowa reakcja organu na światło. Najlepszym jej przykładem jest szybszy wzrost jednej ze stron łodygi pod wpływem padającego pod kątem światła. W przypadku typowego dla roślin fototropizmu dodatniego szybciej rośnie część zacieniona. Powoduje to skrzywienie łodygi w kierunku światła **(20.2.)**. Fototropizm zachodzi tylko w organach zawierających **barwniki fotosyntetyczne**, ponieważ tylko one mogą odebrać bodziec świetlny. Występuje więc przede wszystkim w zielonych częściach roślin, zwłaszcza w liściach. Efektem fototropicznych ruchów ogonków liściowych jest **mozaika liściowa**, czyli takie ustawienie liści, w którym minimalnie się wzajemnie zacieniają. Z kolei część kwiatów (np. słonecznik) stale zwraca się w kierunku słońca. Jest to szczególny rodzaj fototropizmu zwany **heliotropizmem**. Ruchy kwiatów oraz liści mogą być wywołane nie tylko ruchami wzrostowymi, lecz także zmianami **turgoru** w poduszeczkach u nasady liścia lub kwiatu. Korzenie czepne bluszczu wykazują natomiast fototropizm ujemny, co ułatwia im znajdowanie podpory. W fototropizmie bardzo duże znaczenie mają hormony roślinne – **auksyny**, które szerzej omówiono w następnym rozdziale.



20.2. Fototropizm jest efektem nierównomiernego wzrostu wydłużeniowego po dwóch stronach łodygi.

Geotropizm to kierunkowa reakcja organów rośliny na pole grawitacyjne. Przebiega ona podobne jak w przypadku fototropizmu, jednak równie częsty jest geotropizm ujemny, jak dodatni. Ten ostatni wykazuje większość korzeni.



20.3. Geotropizm

? Wyjaśnij, jaką rolę w życiu rośliny odgrywają wąsy czepne reagujące na dotyk podpory.



20.4. Geotropizm ujemny u korzeni oddechowych drzewa mangrowego z rodzaju *Avicennia*



20.5. Przykład tigmotropizmu – wąsy czepne owinięte wokół podpory

Dolna strona poziomo ułożonego korzenia rośnie wolniej niż górna, co skutkuje zagięciem końca korzenia w dół i jego wrastaniem w glebę. Z kolei wierzchołek położonej poziomo **łodygi** wykazuje geotropizm **ujemny** – rośnie słabiej po stronie górnej, stąd zagięcie w górę i wzrost w tym kierunku **(20.3.)**. Geotropizm ujemny wykazują też **korzenie oddechowe**, wyrastające ponad powierzchnię ziemi **(20.4.)**. Reakcja na pole grawitacyjne również związana jest z obecnością hormonów, natomiast odbieranie bodźca umożliwiają ciężkie struktury zawarte w komórce (np. ziarna skrobi), które opadają ku jej dolnej stronie i przez to wskazują jej ułożenie.

Chemotropizm jest reakcją na substancje chemiczne (np. zawarte w glebie). W zależności od typu substancji dana roślina może wykazywać zarówno chemotropizm dodatni, jak i ujemny. Szczególnym typem chemotropizmu jest **hydrotropizm**, czyli reakcja na zawartość (potencjał) wody. Jest on bardzo ważny w regulacji wzrostu korzeni w taki sposób, żeby mogły zapewnić roślinie optymalną ilość wody.

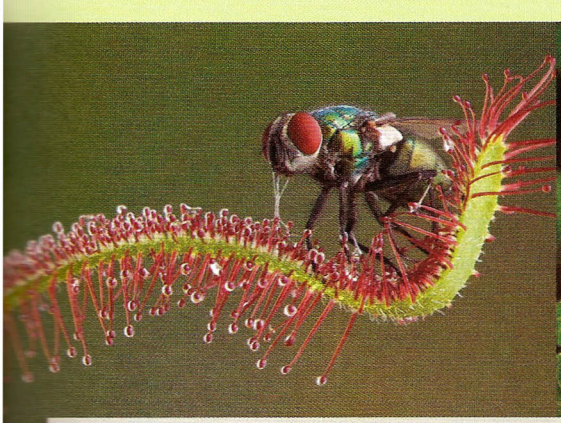
Tigmotropizm jest reakcją na dotyk. Jego typowym przykładem są **wąsy czepne** i wijące się łodygi roślin, które reagują na dotyk potencjalnej podpory i regulują wzrost tak, aby owinąć się wokół niej **(20.5.)**.

Nastie

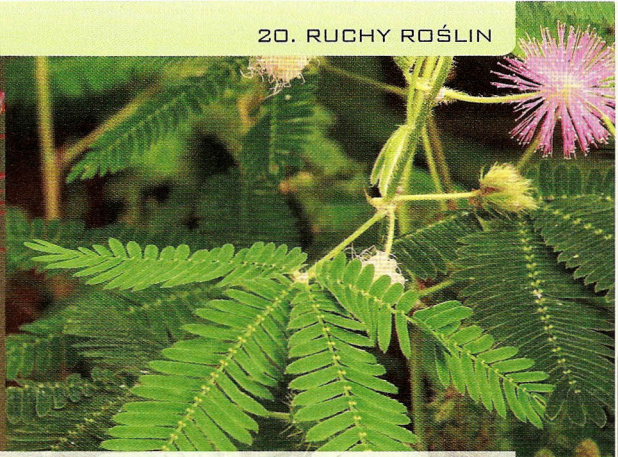
W przeciwieństwie do tropizmów, **nastie** są ruchami nieukierunkowanymi, nawet jeśli są reakcją na bodźce kierunkowe. Mogą mieć charakter ruchów wzrostowych, ale częściej polegają na odwracalnych zmianach **turgoru komórek**. Nastie mogą w związku z tym mieć postać wielokrotnych powtórzeń ruchów (np. otwierania i zamykania lub podnoszenia i opuszczania organu). Podobnie jak w przypadku tropizmów, w zależności od bodźca można wyróżnić wiele typów nastii.

Fotonastie to reakcje na **światło**, jednak w przeciwieństwie do fototropizmów nie wpływają na ustawienie organu względem światła. Roślina reaguje na samą obecność bodźca świetlnego, nie uwzględnia jego kierunku. Przykładem fotonastii jest otwieranie i zamykanie kwiatów w zależności od natężenia światła. Część kwiatów otwiera się w dzień (czasem nawet o konkretnej porze), inne z kolei otwierają się tylko w nocy. Bardzo wrażliwe na światło są na przykład kwiaty goryczek. Z kolei w przypadku **termonastii** czynnikiem decydującym o reakcji rośliny jest temperatura. Czasem nawet niewielkie jej wahania powodują otwieranie się kwiatów (np. krokusy reagują na zmianę rzędu 0,2°C!).

Chemonastie to reakcje na zawartość określonych związków chemicznych. Przykładem może być **hydronastia**, czyli reakcja na zawartość wody w roślinie. Z kolei liście pułapkowe roślin owadożernych reagują na obecność określonych składników ciała owada (np. białek). Skutkuje to wygięciem włosków z gruczołami trawiennymi do środka liścia i wydzieleniem enzymów trawiennych **(20.6.)**. Duże znaczenie w tym przypadku ma też reakcja włosków gruczołowych na dotyk owada, czyli **sejsmonastia**. Na skutek



20.6. Liść rosiczki (*Drosera* sp.) z pochwyconą muchą z rodziny plujkowatych (Calliphoridae)



20.7. Mimoza (*Mimosa* sp.)

bodźca mechanicznego dochodzi do szybkiej i rozległej zmiany **turgoru** komórek (efektem jest ruch włosków rosiczki albo np. zamykanie się pułapek muchołówki). Sejsmonastie są zwykle ruchami bardzo szybkimi (najszybszymi spośród spotykanych u roślin!). Ich przykładami są reakcje liści mimozy na dotyk **(20.7.)** lub wystrzeliwanie pyłku przez pręciki berberysu.

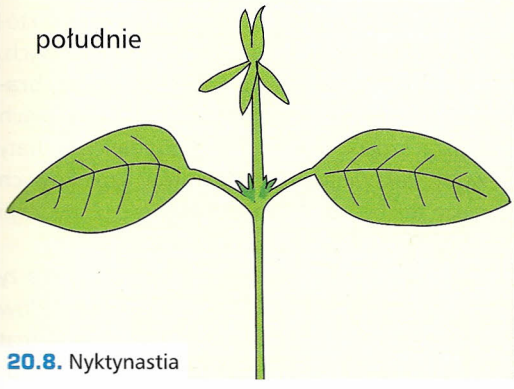
Nyktynastie (lub inaczej **ruchy senne**) zależą od wewnętrznych rytmów dobowych rośliny **(20.8.)**. Rytmy te są jednak modyfikowane pod wpływem warunków zewnętrznych, podobnie jak to jest w przypadku rytmu snu i czuwania człowieka. Często trudno w związku z tym odróżnić nyktynastie od **fotonastii** lub **termonastii**. Dlatego warto wiedzieć, że nyktynastie występują również, gdy roślina zostanie umieszczona w warunkach stałego oświetlenia i temperatury.

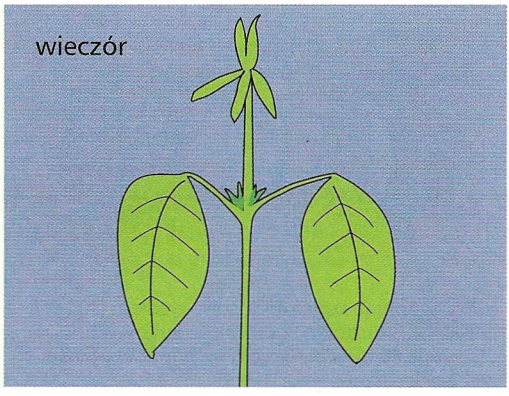
Ruchy aparatów szparkowych

Bardzo ważnym typem **nastii** polegających na zmianach turgoru komórek są ruchy **aparatów szparkowych**. **Transpiracja szparkowa** jest elementem transportu wody w roślinie oraz wymiany gazowej, która w przeważającej mierze odbywa się właśnie za pomocą aparatów szparkowych. Są one niewielkie, jednak występują bardzo licznie **(20.9.)**, co ma związek z tak

:: Ciekawostka

Reakcje mimozy na dotyk są nie tylko szybkie, ale obejmują cały liść (również miejsca, które nie zostały bezpośrednio dotknięte). Jest to możliwe dzięki wytworzeniu fali potencjału czynnościowego rozprzestrzeniającej się między komórkami (jest to więc zjawisko podobne do przewodnictwa nerwowego u zwierząt). Zmiana potencjału wpływa na przepuszczalność błony komórkowej dla jonów i zmianę turgoru komórek. Efektem jest ruch kolejnego fragmentu liścia. Taka reakcja mimozy ma prawdopodobnie na celu odstraszenie potencjalnych pasożytów.



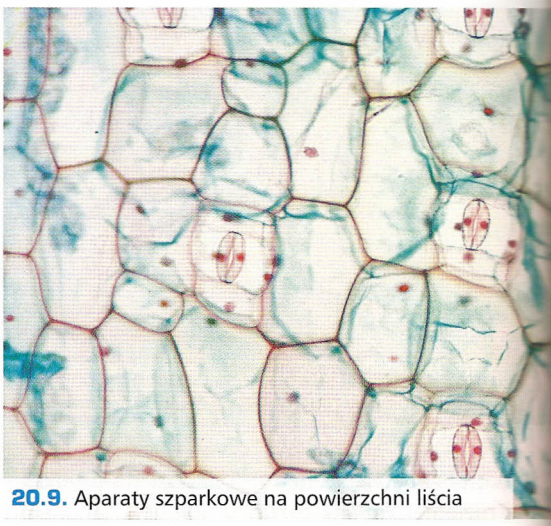


20.8. Nyktynastia

zwanym **efektem brzeżnym**. Powoduje on, że ruch gazów jest największy przy brzegach otworów, a nie w ich części centralnej. Dzięki temu wymiana gazowa zachodzi sprawniej w dużej liczbie niewielkich otworów niż w jednym dużym, małe aparaty szparkowe mają bowiem znacznie większą powierzchnię przylegającą do brzegów. Niewielkie rozmiary pozwalają też na sprawną **regulację** stopnia otwarcia szparek, co jest bardzo ważne dla gospodarki wodnej rośliny.

U większości roślin obecność **światła**, **niskie stężenie dwutlenku węgla** i **duża ilość wody** stymuluje **otwieranie** aparatów szparkowych, podczas gdy brak światła, wysokie stężenie dwutlenku węgla i niska zawartość wody powodują ich zamykanie. Każdy aparat szparkowy składa się z dwóch **komórek szparkowych**. W związku ze specyficzną budową ich ściany komórkowej, występujące w nich zmiany **turgoru** pozwalają na otwieranie i zamykanie aparatu szparkowego. Celulozowe zgrubienia części **ścian komórkowych** powodują, że gdy rośnie turgor, komórki szparkowe wyginają się na zewnątrz i pojawia się między nimi szczelina.

Wzrost turgoru jest rezultatem szeregu reakcji. Zapoczątkowuje je działanie **światła** (jest to przykład **fotonastii**). Dochodzi do wzrostu stężenia jonów potasu na skutek ich transportu do komórek szparkowych (**20.10.**). To **transport aktywny**, a więc wymagający wykorzystania **ATP**. Zawarta w aparatach szparkowych skrobia jest rozkładana do **jabłczanu**. Oba procesy powodują znaczny **wzrost ciśnienia osmotycznego** w komórkach szparkowych, a więc równocześnie **spadek potencjału wody**. Skutkuje to zasysaniem

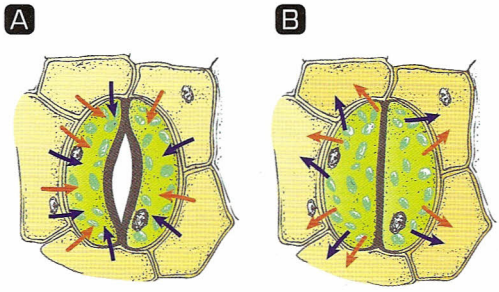


20.9. Aparaty szparkowe na powierzchni liścia

wody z sąsiednich komórek liścia i przestrzeni międzykomórkowych. Rośnie **turgor** komórek szparkowych i aparat szparkowy się otwiera. Gdy światło osłabnie, transport jonów potasu do komórek szparkowych ustaje, a równocześnie intensywnie wydostają się one poza komórkę. Z jabłczanu odtwarzana jest **skrobia**. Potencjał wody znacznie wzrasta i wypływa ona z komórek szparkowych. Turgor maleje i aparaty szparkowe się zamykają.

Opisany wyżej proces zachodzi bez zakłóceń jedynie przy obfitości wody. Gdy jej brakuje, komórka szparkowa nie może uzyskać odpowiedniego **turgoru**. Aparat szparkowy albo wcale się nie otwiera, albo tylko w niewielkim stopniu. Na reakcję komórek szparkowych w tej sytuacji mają wpływ również **hormony roślinne**, przede wszystkim **kwas abscysynowy** (ABA). Jest on syntetyzowany i uwalniany w razie **niedoboru wody** w komórkach (np. przy spadku ilości wody w korzeniach, z których przemieszcza się ona do liści). ABA powoduje zamykanie **kanałów**, którymi potas dostaje się do komórek szparkowych. Efekt fizjologiczny jest więc podobny jak przy **braku światła**: maleje turgor komórek szparkowych i aparat szparkowy się zamyka, co zmniejsza straty wody. Jak widać, ruch aparatów szparkowych może też być reakcją na dostępność wody, czyli można go nazwać **hydronastią.**

Regulacja działania aparatu szparkowego przy niedoborze wody to tylko jeden z przykładów działania hormonów roślinnych. Szerzej ten temat jest mowa w następnym rozdziale.



20.10. Aparat szparkowy przy wysokim (A) i niskim (B) turgorze komórek szparkowych; czerwone strzałki oznaczają ruch jonów potasu, niebieskie strzałki – ruch wody.

:: Doświadczenie

Wpływ światła i grawitacji na wzrost roślin

Materiały: 2 prostokątne naczynia szklane lub plastikowe (jedno przezroczyste, drugie w całości nieprzezroczyste), bibuła, trociny (lub gaza), nasiona gorczycy, proste siewki grochu lub fasoli (długości 4–6 cm), czarna taśma lub papier (do oklejenia naczyń)

Wykonanie:

1. Nasiona gorczycy moczyć przez 10 minut, aż napęcznieją. Ścianki jednego z naczyń okleić w całości czarnym papierem lub taśmą, tak aby do środka nie docierało światło, jednak zostawić szczelinę (1 cm x 0,5 cm). Na ściance prostopadłej do ściany ze szczeliną umocować zwilżoną bibułę, a na dno nalać trochę wody (tak, by podsiąkała). Nasiona gorczycy przykleić do bibuły (mają dużo śluzu). Naczynie ustawić szczeliną w stronę źródła światła.
2. Drugie naczynie również okleić, ale bez pozostawiania szczeliny. Dość grubą warstwę gazy lub trocin umieścić na dnie i dokładnie zwilżyć. Na niej ułożyć siewki grochu lub fasoli.
3. Oba naczynia przykryć (tak, aby również od góry nie docierało światło!) i pozostawić na tydzień. Należy co jakiś czas sprawdzać wilgotność gazy lub bibuły, jednak uważając, by nie zmienić położenia naczyń i nie wystawić siewek na dłuższe działanie światła.

Wyniki: Kształt i ułożenie siewek wskazują na bodźce działające na kiełkujące rośliny.

Wnioski: Odchylenia organów w odpowiednich kierunkach wskazują odpowiednio na **fototropizm dodatni** i **ujemny** (w pierwszym naczyniu) oraz **geotropizm dodatni** i **ujemny** (w drugim naczyniu).

PODSUMOWANIE



- Ruch roślin jest stosunkowo powolny, jednak występuje powszechnie i ma duże znaczenie dla ich funkcjonowania.
- Nie istnieją wyspecjalizowane tkanki odpowiadające za ruch roślin. Jego podłożem są ruch wzrostowy i zmiany turgoru komórek różnych tkanek.
- Taksje to ruchy całych organizmów jednokomórkowych oraz gamet. Do najczęstszych należą fototaksje i chemotaksje.
- Tropizmy to kierunkowe ruchy organów roślin. Do najważniejszych należą: fototropizm, geotropizm, chemotropizm i tigmotropizm.
- Nastie to bezkierunkowe reakcje rośliny. Do najważniejszych należą: fotonastie, termonastie, chemonastie i sejsmonastie (najszybsze ruchy roślin).
- Ruchy aparatów szparkowych to dokładnie regulowane nastie związane ze zmianami turgoru komórek szparkowych. Są reakcją na światło, a także na ilość wody w roślinie i zawartość dwutlenku węgla.

ZADANIA



1. Sporządź tabelę, w której porównasz wymienione w rozdziale typy ruchów roślin pod względem rodzaju bodźca oraz kierunkowości ruchu.
2. Wyjaśnij, jak przebiega otwieranie i zamykanie aparatów szparkowych.
3. Podaj dwa mechanizmy, jakie mogą być wykorzystywane podczas ruchu roślin.
4. Wyjaśnij, w jaki sposób liście pułapkowe rośliny owadożernej reagują na złapanie owada.
5. Podaj nazwę ruchu kwiatów słonecznika kierujących się w ciągu dnia w stronę słońca.

BIBLIOGRAFIA



- Wojtaszek P., *Po co i w jaki sposób mimoza składa liście*, „Świat Nauki" 2007, nr 12.

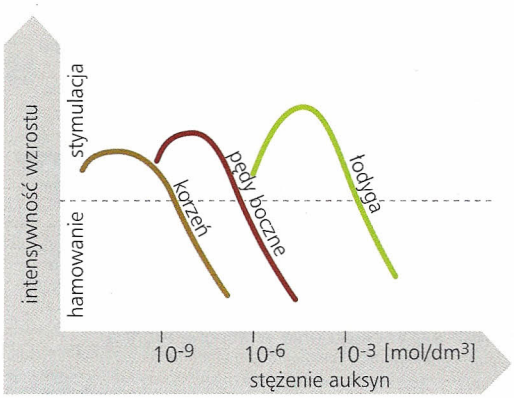
21. Hormony roślinne. Fotoperiodyzm

Różnorodne procesy zachodzące równocześnie w organizmie roślinnym wymagają sprawnych mechanizmów regulujących i integrujących. Funkcję tę spełniają **hormony roślinne** (fitohormony). Odpowiadają one również za przejście roślin do fazy generatywnej (w tym np. za wykształcanie pędów kwiatowych). Proces ten jest ściśle kontrolowany i zależy między innymi od długości dnia i nocy. Zjawisko to określa się jako **fotoperiodyzm**.

Hormony roślinne

W organizmach roślinnych zachodzi **równocześnie** wiele bardzo skomplikowanych procesów. Ich liczba i złożoność wymagają precyzyjnej regulacji, która zapobiega zaburzeniu równowagi między nimi, co mogłoby prowadzić nawet do śmierci rośliny (np. w wyniku odwodnienia spowodowanego nadmierną transpiracją). U roślin nie wykształcił się układ nerwowy, gdyż w związku z ich dość powolnymi reakcjami i zupełnie odmiennym od zwierząt sposobem odżywiania nie był konieczny. Wiele procesów regulowanych jest więc na zasadzie **sprzężeń zwrotnych**. Gdy okazuje się to niemożliwe, rośliny wykorzystują mechanizm regulacji hormonalnej, podobny do spotykanego u zwierząt.

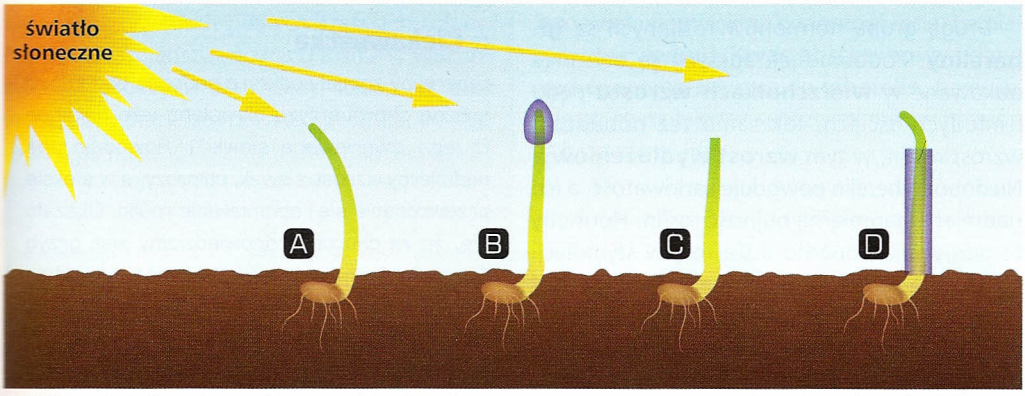
Hormony roślinne (lub inaczej **fitohormony**), podobnie jak hormony zwierzęce, wykazują silne działanie już w niewielkich stężeniach (nawet poniżej 10^{-6} mol/dm^3). Wynika to z faktu, że nie są substratami reakcji, a jedynie regulują ich przebieg. Związki chemiczne pełniące funkcję fitohormonów są szeroko rozpowszechnione (występują u różnych grup roślin,w tym u wszystkich roślin wyższych), co upodabnia je do hormonów zwierzęcych. Jednak w przeciwieństwie do tych ostatnich, hormony roślinne najczęściej działają w tym miejscu, w którym są wytwarzane. Poza tym u roślin (inaczej niż u zwierząt) nie występują specjalne gruczoły produkujące hormony.



21.1. Wpływ różnych stężeń auksyn na wzrost organów rośliny

Każdy hormon roślinny działa na wiele procesów metabolicznych zachodzących w różnych organach rośliny (jest to tzw. działanie **plejotropowe**). Ponadto każdy proces jest regulowany przez wiele hormonów – zarówno o wzmacniającym, jak i osłabiającym działaniu. W dodatku ten sam hormon może działać przeciwstawnie w zależności od stężenia, w jakim występuje – pobudzać w wysokim stężeniu i hamować w niskim (lub na odwrót) (21.1.). Tworzy to skomplikowaną sieć zależności pomiędzy hormonami i efektami ich działania, która pozwala na zachowanie stanu równowagi (**homeostazy**) organizmu rośliny.

Stopień komplikacji regulacji hormonalnej u roślin znacznie utrudnia badania nad nią. Jednym z pierwszych doświadczeń, które wykazały istnienie hormonów roślinnych, były przeprowadzone przez Karola Darwina i jego syna, Francisa, badania nad siewkami traw. Zostały one później rozwinięte przez Fritsa Wenta. Podczas kiełkowania traw w pierwszej kolejności na powierzchni pojawia się **koleoptyl**, czyli utworzona z pierwszego liścia pochewka (osłaniająca m.in. **stożek wzrostu**). Badania wykazały, że siewka pozbawiona szczytowej części koleoptylu nie wygina się w kierunku światła – nie występuje u niej **fototropizm**. Podobna reakcja



21.2. Doświadczenie z wykorzystaniem siewek traw: po wystawieniu na działanie światła rośliny z zasłoniętymi (B) lub usuniętymi (C) wierzchołkami nie wykazywały fototropizmu; rośliny nieosłonięte (A) lub osłonięte w całości poza wierzchołkiem (D) reagowały na światło normalnie.

występuje, gdy koleoptyl jest osłonięty przed światłem. Natomiast jeśli szczyt koleoptylu nie zostanie usunięty, siewka wykazuje typowy fototropizm dodatni **(21.2.)**. Jednak wygina się nie sam wierzchołek, lecz położona niżej część, w której odbywa się intensywny **wzrost wydłużeniowy**. Podobnie dzieje się, jeśli na siewce po odcięciu czubka koleoptylu położony zostanie bloczek agarowy, który miał kontakt z odciętym czubkiem (a więc przeniknęły do niego odpowiednie związki chemiczne). Wyniki tego doświadczenia wskazują, że pod wpływem **światła** na szczycie koleoptylu produkowany jest związek przenoszony następnie do niższych części kiełkującej rośliny. Gdy tam dotrze, wpływa na wzrost wydłużeniowy.

Związkiem odpowiedzialnym za opisane powyżej zjawisko jest kwas indoliloctowy (IAA), należący do **auksyn** (z gr. *auksano* – „powiększam"). Hormony te są produkowane w **wierzchołkach wzrostu** pędu i młodych liściach. Większe stężenie auksyn występuje po zacienionej stronie łodygi, a to wzmacnia wzrost elongacyjny i powoduje **reakcję fototropiczną**. Podobną rolę auksyny odgrywają w **geotropizmie**, inny jest tylko bodziec i sposób jego odbierania. Auksyny hamują także rozwój pąków bocznych w wyniku tak zwanej dominacji wierzchołkowej. Oznacza to, że produkujący te hormony pąk szczytowy ogranicza rozwój innych pąków. Po jego usunięciu stężenie auksyn spada, co stymuluje wzrost pędów bocznych i rozkrzewianie się rośliny **(21.3.)**. Tę zależność często wykorzystuje się w uprawie roślin doniczkowych – w celu odpowiedniego ich formowania odcina się czubek głównego pędu. Auksyny stymulują też rozwój korzeni, co wykorzystuje się w ogrodnictwie (są one składnikiem tzw. ukorzeniaczy). Hormony te są poza tym produkowane przez rozwijające się nasiona i pobudzają rozwój owoców, dlatego spryskanie auksynami ich zawiązków może spowodować, że rozwiną się one, mimo że nie zawierają zapłodnionych nasion.

? Wyjaśnij, z czego wynika i jakie znaczenie ma dla rośliny reakcja pędów bocznych na usunięcie głównego wierzchołka.



21.3. Wpływ usunięcia głównego wierzchołka na rozwój pędów bocznych

Drugą grupą hormonów roślinnych są **gibereliny**. Podobnie jak auksyny są one produkowane w **wierzchołkach wzrostu** pędu i młodych liściach, tak samo też pobudzają wzrost roślin, w tym **wzrost wydłużeniowy**. Niedobór giberelin powoduje karłowatość, a ich nadmiar – nadmierną bujność roślin. Hormony te odgrywają ponadto dużą rolę w stymulacji kwitnienia. Podanie giberelin powoduje powstanie pędów kwiatowych, nawet jeżeli rośliny nie zostały pobudzone przez odpowiednią długość dnia i nocy (więcej na ten temat w dalszej części rozdziału).

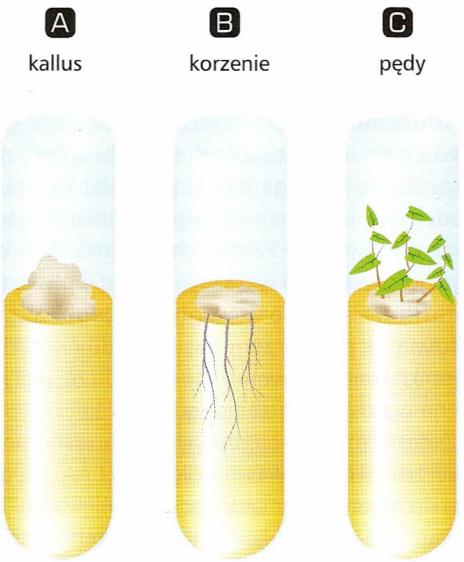
Kolejna grupa hormonów to **cytokininy**, które w przeciwieństwie do auksyn są syntetyzowane głównie w **korzeniach** i rozprowadzane przez **ksylem**. Stymulują one podziały komórek, współdziałają też z **auksynami** podczas różnicowania się organów. Wysokie stężenie cytokinin i małe auksyn powoduje, że z niezróżnicowanych komórek powstaje pęd. Jeśli hormony występują w odwrotnych stężeniach – powstają korzenie **(21.4.)**. Ma to duże znaczenie dla rośliny, ponieważ pozwala regulować rozwój organów w zależności od potrzeb. Przy słabo rozwiniętym systemie korzeniowym stężenie cytokinin w stosunku do auksyn jest niskie, a to stymuluje rozwój korzeni. Z kolei przy silnie rozwiniętym systemie korzeniowym stężenie auksyn jest niskie w stosunku do cytokinin. Pobudza to rozwój części nadziemnej. Cytokininy działają też antagonistycznie do auksyn na pąki boczne, stymulując ich rozwój.

Większość fitohormonów to skomplikowane związki (np. pochodne **zasad azotowych**), Natomiast **etylen** to drobnocząsteczkowy gaz o wzorze chemicznym C_2H_4. Stan skupienia ułatwia mu przemieszczanie się w powietrzu. Etylen jest syntetyzowany głównie w dojrzewających **owocach** i starzejących się **liściach**. Hormon ten stymuluje wzrost i dojrzewanie owoców, kiełkowanie nasion oraz starzenie się organów roślin (np. zrzucanie liści) **(21.5.)**. Etylen często działa na zasadzie **sprzężenia zwrotnego dodatniego**: dojrzewanie jednego owocu powoduje wydzielanie etylenu, który stymuluje dojrzewanie sąsiednich owoców i dalsze wydzielanie etylenu. Tę właściwość wykorzystuje się w transporcie i przechowywaniu owoców (np. sprzedawanych w Europie bananów). Można je zebrać w stanie niedojrzałym, a następnie w specjalnych dojrzewalniach rozpylić etylen, co spowoduje ich szybkie i równomierne dojrzewanie.

W rozdziale 20. była mowa o roli w regulacji działania aparatów szparkowych jeszcze jednego hormonu roślinnego – kwasu abscysynowego (ABA). Powstaje on głównie w dojrzałych liściach,

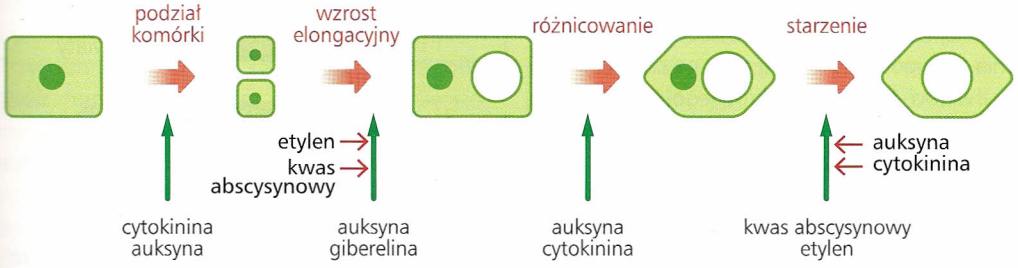
:: Ciekawostka

Giberelliny zostały odkryte podczas badań nad groźną chorobą ryżu określaną jako *bakanae* (z jap. „zwariowane siewki"). Powoduje ona nadmierny wzrost siewek, chlorozy, a w efekcie przewracanie się i obumieranie roślin. Okazało się, że za chorobę odpowiedzialny jest grzyb *Giberella fujikuroi*. Jego obecność powoduje nadprodukcję hormonu roślinnego, nazwanego gibereliną od nazwy grzyba. Nie jest to jedyny przypadek zmian ilości hormonów w roślinie pod wpływem pasożyta. Bakterie z rodzaju *Agrobacterium* powodują nadmierną produkcję hormonów i niekontrolowany rozrost komórek, czego efektem są narośla występujące na roślinach.



21.4. Wykształcanie się z kallusa (A) organów przy wysokim stężeniu auksyn i niskim cytokinin (B) lub niskim auksyn i wysokim cytokinin (C)

ale też w korzeniach i innych częściach rośliny. Poziom kwasu abscysynowego rośnie w **warunkach stresowych** dla rośliny, takich jak brak wody, duże zasolenie i niska temperatura, dlatego można go nazwać roślinnym „hormonem stresu". Jego działanie zwiększa odporność roślin na niekorzystne warunki. **Kwas abscysynowy** odgrywa rolę antagonistyczną do **giberelin**, hamując wzrost; stymuluje też spoczynek pąków i nasion oraz opadanie liści.



21.5. Wpływ hormonów na rozwój i dojrzewanie komórek; zielonymi strzałkami zaznaczono pobudzanie procesu, czerwone wskazują jego hamowanie.

Fotoperiodyzm

W życiu roślin, podobnie jak to jest w przypadku zwierząt, bardzo duże znaczenie mają różnego rodzaju cykle. Najbardziej podstawowymi są **cykle dobowe**, regulowane przez światło i temperaturę. Umożliwiają one roślinie odpowiednie funkcjonowanie w różnych porach dnia i w nocy. Często ma to krytyczne znaczenie (jak np. zachodzenie transpiracji u roślin przeprowadzających fotosyntezę typu CAM we właściwej porze). Z kolei **wewnętrzne rytmy roślin** nie zależą od warunków zewnętrznych, tak samo jak rytm snu i czuwania człowieka. Są one w dużej mierze regulowane hormonalnie. Ich przejawem są **nyktynastie**, czyli ruchy senne, które występują również w całkowitej ciemności.

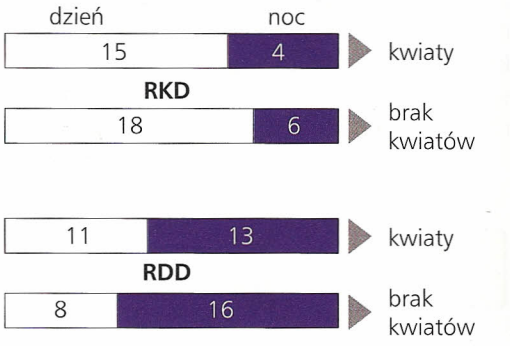
W klimatach, w których występuje duża zmienność warunków w ciągu roku (np. lato i zima lub też pora deszczowa i sucha), bardzo duże znaczenie w życiu roślin mają **cykle roczne**. Rośliny muszą dopasować porę kwitnienia tak, żeby zdążyć wydać nasiona, zanim warunki staną się niekorzystne. Z kolei zbyt wczesne kwitnienie może powodować, że roślina nie będzie mieć dość czasu na zgromadzenie substancji odżywczych potrzebnych do wytworzenia kwiatów i nasion. Podstawowym mechanizmem regulującym zakwitanie jest **fotoperiodyzm.** Oznacza to, że roślina zakwita przy odpowiedniej długości dnia i nocy. Zatem można powiedzieć, że **cykl roczny** jest regulowany na podstawie **cykli dobowych**. Jeśli rośliny, których kwitnienie zależy od długości dnia i nocy, zostaną posiane w pewnym odstępie czasu, to wszystkie zakwitną jednocześnie, nawet gdy te posiane później będą znacznie mniejsze.

W zależności od preferowanej na porę kwitnienia długości dnia i nocy wyróżniamy **rośliny dnia długiego** (RDD lub ang. *long day plants* – LDP) i **rośliny dnia krótkiego** (RKD lub ang. *short day plants* – SDP). Nie oznacza to, że rośliny dnia długiego zakwitają, gdy dzień jest dłuższy niż noc, a rośliny dnia krótkiego – gdy noc jest dłuższa od dnia! Rośliny dnia długiego potrzebują po prostu dnia o pewnej minimalnej długości, czyli **równego** określonej liczbie godzin **lub dłuższego** od niej. Z kolei rośliny dnia krótkiego potrzebują dnia równego danej liczbie godzin lub krótszego od niej. To, jaka długość dnia jest potrzebna do zakwitnięcia, zależy od gatunku rośliny. Na przykład rzepień pospolity (*Xanthium strumarium*) jest rośliną dnia krótkiego i zakwitnie, gdy dzień będzie miał 15 godzin lub mniej. Z kolei lulek czarny (*Hyoscyamus niger*) jest rośliną dnia długiego i potrzebuje, aby dzień trwał przynajmniej 11 godzin. Zatem jeśli dzień będzie miał długość

od 11 do 15 godzin (czyli np. 13), zakwitną obie rośliny (21.6.). W praktyce **rośliny dnia długiego** kwitną wiosną, gdy dzień się wydłuża. Natomiast **rośliny dnia krótkiego** kwitną, gdy dzień staje się coraz krótszy, a więc od początku lata do jesieni.

Wbrew nazwie, jeden i drugi typ roślin jest bardziej wrażliwy na długość nocy niż na długość dnia. Jeśli podczas długiej nocy na chwilę pojawi się światło, roślina dnia krótkiego potraktuje to jako długi dzień i nie zakwitnie. Natomiast roślina dnia długiego naświetlana przez pewien czas w nocy też potraktuje to jako długi dzień, ale zakwitnie (21.7.). Zaciemnianie roślin w dzień nie powoduje takich efektów. Takie reakcje są konsekwencją **fizjologicznego mechanizmu** „liczenia" przez roślinę długości nocy i dnia.

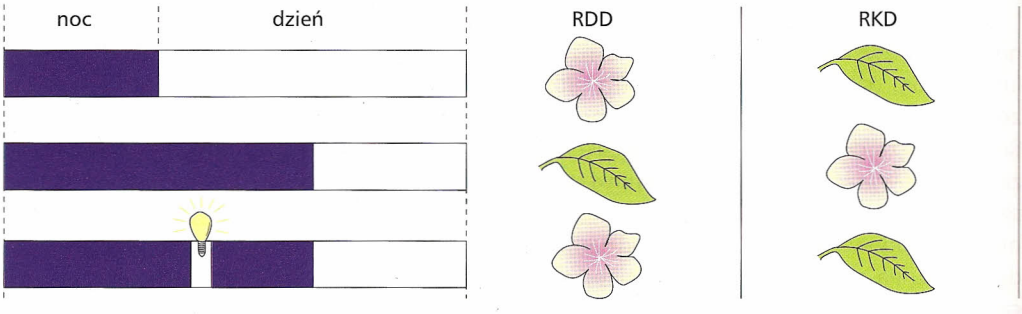
Za opisane rekcje odpowiada **fitochrom** (oznaczany literą P, z ang. *phytochrome*) – **błękitny barwnik** zawarty w liściach. W zależności od pory dnia fitochrom może występować w jednej z dwóch form. Pierwsza ma maksimum absorpcji około 660 nanometrów, czyli w zakresie widzialnego światła czerwonego. Dlatego oznacza się ją symbolem $\mathbf{P_r}$ (z ang. *red* – „czerwony"). Maksimum absorpcji drugiej formy to w przybliżeniu 730 nanometrów, czyli daleka czerwień (z ang. *far red*). Stąd jej oznaczenie – $\mathbf{P_{fr}}$. W uproszczeniu, pochłonięcie światła **czerwonego** powoduje przejście formy P_r w P_{fr}, a pochłonięcie światła z zakresu **dalekiej czerwieni** – odwrotną przemianę. Pierwsza reakcja zachodzi w dzień (tzn. forma P_r przechodzi w P_{fr}), ponieważ jest wtedy dużo światła czerwonego. Natomiast daleka czerwień jest obecna również w nocy i wtedy P_{fr} przechodzi w P_r. Porównanie czasu, w którym



21.6. Zależność kwitnienia przykładowych roślin dnia krótkiego i dnia długiego od długości dnia

dominuje każda z form fitochromu, pozwala roślinie określić, jakie są proporcje dnia i nocy. Jeśli w nocy pojawi się światło widzialne, w którym jest dużo światła czerwonego, zwiększa się udział P_{fr} w fitochromie i jego przemiana zaczyna się od nowa. Roślina odczytuje to jako krótką noc.

Opisany wyżej proces umożliwia roślinie zliczenie godzin światła i ciemności, jednak to dopiero początek przemian, które prowadzą do zakwitnięcia. Niektóre rośliny potrzebują kilku dni o odpowiedniej długości dnia, żeby stymulować kwitnienie, które nastąpi całe tygodnie później. Część roślin wymaga, aby dni krótkie i długie następowały we właściwej kolejności (tzn. konieczna jest odpowiednia sekwencja zmian długości dnia i nocy). Są też rośliny obojętne na liczbę godzin, w czasie których świeci światło. Mechanizmy regulujące kwitnienie i umożliwiające roślinie reakcję na zmiany form fitochromu są jeszcze słabo poznane. Wiadomo jednak, że duże znaczenie w tych procesach mają **hormony roślinne** należące do giberelin.



21.7. Kwitnienie roślin dnia długiego (RDD) i roślin dnia krótkiego (RKD) w zależności od czasu naświetlania (zwróć uwagę na rolę krótkiego doświetlania w ciągu nocy)

Termiczna indukcja kwitnienia

Długość dnia i nocy nie jest jedynym czynnikiem decydującym o kwitnieniu. Bardzo ważna, zwłaszcza w klimacie takim jak panujący w Polsce, jest temperatura. Część roślin nie zakwita, jeśli przez pewien okres nie są wystawione na działanie chłodu. Dotyczy to wielu roślin jednorocznych, dwuletnich, a nawet wieloletnich. Przynajmniej przez jakiś czas temperatura musi spaść poniżej określonej wartości (najczęściej między 0–10°C). Proces ten nazywany jest **wernalizacją** (**jaryzacją**) i może zajść nawet wiele miesięcy przed wykształceniem kwiatów. Dobrym przykładem są rośliny dwuletnie (jak marchew, cebula lub kapusta głowiasta). Jednego roku wytwarzają one dużo liści i magazynują substancje odżywcze (np. w korzeniach). Po przetrwaniu zimy (i wernalizacji), następnego roku zakwitają, gdy długość dnia jest odpowiednia, a po wydaniu nasion – giną. Brak okresu chłodnego powoduje, że roślina nie zakwita, mimo odpowiedniej długości dnia i nocy, a także zgromadzenia dużych zapasów. Rośliny wymagające przeżycia okresu chłodu przed zakwitnięciem określa się jako **ozime**. Natomiast rośliny **jare** to takie, których kwitnienie jest uwarunkowane wyłącznie fotoperiodyzmem. W uprawie często wykorzystuje się jare i ozime odmiany tych samych gatunków roślin (np. zbóż). Podobnie jednak jak w przypadku fotoperiodyzmu, fizjologiczne mechanizmy odpowiedzialne za zjawisko wernalizacji są wciąż słabo poznane.

PODSUMOWANIE



- Hormony roślinne (fitohormony) są odpowiedzialne za integrację i regulację wszystkich procesów zachodzących w roślinie (utrzymują homeostazę).
- Fitohormony działają w bardzo małych stężeniach i na wiele organów równocześnie (tzw. działanie plejotropowe).
- Auksyny to hormony produkowane w wierzchołkach wzrostu łodygi, odpowiedzialne za ruchy tropiczne, rozwój korzeni i regulację wzrostu pędu.
- Gibereliny odpowiadają za pobudzanie wzrostu rośliny i powstawanie pędów kwiatowych.
- Cytokininy są produkowane w korzeniach i stymulują rozwój części nadziemnych.
- Etylen to gazowy hormon przyspieszający dojrzewanie owoców oraz starzenie się organów (np. opadanie liści).
- Kwas abscysynowy odpowiada za ochronę przed czynnikami stresowymi (odwodnienie).
- Fotoperiodyzm to zakwitanie rośliny w zależności od długości dnia i nocy. Za regulację tego procesu odpowiada fitochrom.
- W zależności od preferowanej do zakwitania długości dnia, wyróżniamy rośliny dnia długiego i rośliny dnia krótkiego.
- Wernalizacja (jaryzacja) to zachodzące podczas okresu chłodnego zmiany, które umożliwiają późniejsze zakwitnięcie rośliny.

ZADANIA



1. Wyjaśnij, w jaki sposób współdziałanie auksyn i cytokinin reguluje rozwój korzeni i części nadziemnych roślin.
2. Sporządź tabelę, w której zestawisz miejsca syntezy i działania hormonów roślinnych. Wskaż hormony, które oddziałują na te same organy, w których są syntetyzowane.
3. Wyjaśnij, dlaczego kwas abscysynowy bywa określany jako roślinny „hormon stresu".
4. Określ, na czym polega różnica w reakcji na długość dnia między roślinami dnia długiego i roślinami dnia krótkiego.
5. Wyjaśnij rolę fitochromu w regulacji zakwitania roślin.

BIBLIOGRAFIA

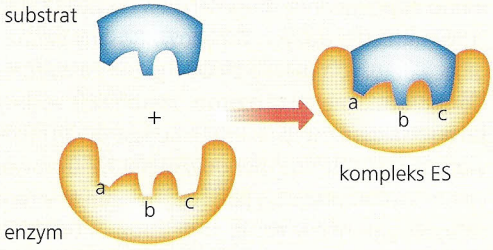


- Szydło W., Falkowski G., *Stymulacja regeneracji korzeni* [online], „Szkółkarstwo" 2006, nr 3.
- Dąbrowska G., Goc A., Tretyn A., *Fotoperiodyczna indukcja kwitnienia roślin krótkiego dnia*, „Wiadomości Botaniczne" 2002, nr 3–4.

Podstawy metabolizmu

Zadanie 1. (2 pkt)

Na rysunku przedstawiono jeden z modeli wiązania enzymu i substratu.



Podaj nazwę tego modelu i wyjaśnij, co pozwala na stwierdzenie, że chodzi właśnie o ten model.

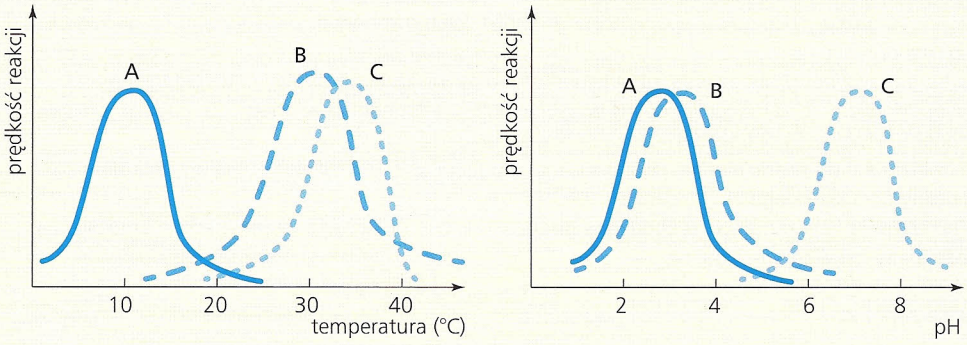
Zadanie 2. (2 pkt)

Wśród wymienionych związków i jonów wskaż dwa, które nie mogą być kofaktorami enzymów.

A. jony metali
B. glicerol
C. pochodne witamin
D. ryboza

Zadanie 3. (3 pkt)

Wykresy przedstawiają zależność aktywności trzech hipotetycznych enzymów (A, B i C) od temperatury i pH.



Określ, który z tych enzymów byłby najbardziej aktywny w warunkach takich jak panujące w żołądku człowieka. Odpowiedź uzasadnij, uwzględniając dane przedstawione na obu wykresach.

Zadanie 4. (2 pkt)

Wśród wymienionych mechanizmów wskaż dwa, które umożliwiają odwracalną regulację aktywności enzymów.

A. fosforylacja
B. inhibicja kompetycyjna
C. obróbka potranslacyjna
D. regulacja transkrypcji

Zadanie 5. (2 pkt)

Zgodnie z hipotezą „świata RNA", kwas rybonukleinowy odpowiadał początkowo zarówno za przekazywanie informacji genetycznej, jak i za katalizowanie reakcji.

Określ, jakie typy związków są obecnie odpowiedzialne za każdą z tych funkcji, oraz podaj nazwę katalitycznych cząsteczek RNA.

Zadanie 6. (2 pkt)

Określ, co należy wpisać w miejsce liter A, B i C w poniższych reakcjach.

$NAD^+ + \mathbf{A}\ e^- + H^+ \rightarrow NADH$

$FAD + \mathbf{B}\ e^- + \mathbf{C}\ H^+ \rightarrow FADH_c$

Zadanie 7. (1 pkt)

Podaj nazwę typu fosforylacji, którą opisuje poniższy tekst.

Podczas fosforylacji tego typu energia wytwarzana jest dzięki transportowi elektronów uzyskanych ze związków organicznych. W standardowej postaci tego procesu ostatecznym akceptorem elektronów jest tlen, więc przy jego braku fosforylacja ta nie zachodzi.

Zadanie 8. (2 pkt)

Wśród poniższych elementów wskaż dwa, które nie są składnikami ATP.

A. reszta fosforanowa
B. guanina
C. pierścień nikotynoamidowy
D. ryboza

Zadanie 9. (1 pkt)

Określ, który typ przemian (katabolizm czy anabolizm) dominuje w wymienionych niżej fazach życia człowieka.

okres prenatalny, dzieciństwo, starość

Zadanie 10. (2 pkt)

Wstawiając znak plus (+) w odpowiednich rubrykach poniższej tabeli, określ, które z wymienionych w niej procesów są kataboliczne, a które – anaboliczne.

Nazwa procesu	Proces kataboliczny	Proces anaboliczny
fotosynteza		
trawienie		
oddychanie komórkowe		
biosynteza białka		

Zadanie 11. (1 pkt)

Podaj nazwę fazy cykli przemian metabolicznych, która umożliwia ciągłe zachodzenie tych cykli.

Oddychanie komórkowe

Zadanie 1. (2 pkt)

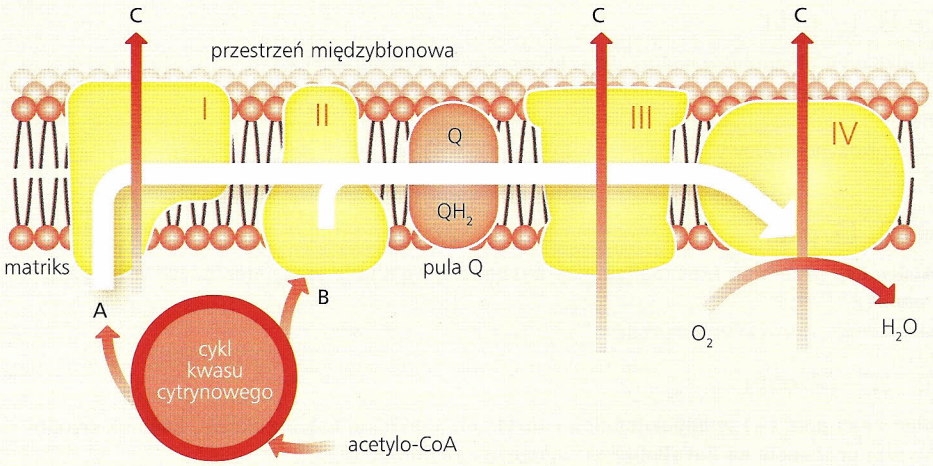
Dopasuj nazwy związków organicznych (kolumna I) do procesów, które są konieczne do włączenia tych związków do cyklu Krebsa (kolumna II).

Pamiętaj, że jeden proces może być odpowiedzialny za metabolizm więcej niż jednego typu związków.

I	II
A. cukry proste	1. glikoliza
B. kwasy tłuszczowe	2. dezaminacja
C. aminokwasy	3. β-oksydacja
D. glicerol	4. glukoneogeneza

Zadanie 2. (3 pkt)

Rysunek przedstawia schemat utleniania w łańcuchu oddechowym.



Określ, jakie związki lub jony zostały zastąpione literami A, B i C (pamiętaj o uwzględnieniu ładunków jonów).

Zadanie 3. (2 pkt)

Wskaż dwa zdania, które nie są prawdziwe w odniesieniu do procesu glukoneogenezy.

A. W glukoneogenezie zużywanych jest mniej cząsteczek ATP, niż powstaje ich w glikolizie.
B. W glukoneogenezie zachodzi o jedną reakcję więcej niż w glikolizie.
C. Enzymy uczestniczące w glukoneogenezie i glikolizie są identyczne.
D. W glukoneogenezie możliwe jest wytworzenie glukozy z niektórych aminokwasów.

Zadanie 4. (2 pkt)

Określ, co należy wpisać w miejsce liter A, B i C w poniższej reakcji.

glukoza + 2 **A** + 2 Pi + 2 NAD^+ → 2 **B** + 2 ATP + 2 **C** + 2 H^+ + H_2O

Zadanie 5. (2 pkt)

Na podstawie danych zawartych w tabeli sporządź wykres słupkowy porównujący ilość ATP powstającą podczas kolejnych etapów tlenowego oddychania komórkowego.

Etap oddychania tlenowego	Glikoliza	Cykl Krebsa	Utlenianie w łańcuchu oddechowym
Liczba cząsteczek ATP	2	2	34

Zadanie 6. (4 pkt)

Uzupełnij tabelę porównującą fermentację mleczanową i alkoholową.

Porównywany aspekt	Fermentacja mleczanowa	Fermentacja alkoholowa
produkty		
zysk energetyczny		
zachodzi w organizmie człowieka (nie/tak)		
przykład grupy mikroorganizmów wykorzystującej ten typ fermentacji		

Zadanie 7. (2 pkt)

Podaj nazwę poniższej reakcji i określ, w której części komórki ona zachodzi.

pirogronian + koenzym A → acetylokoenzym A + CO_2

Zadanie 8. (1 pkt)

Z poniższych zdań wybierz to, które nie jest jednym z twierdzeń teorii chemiosmotycznej Mitchella.

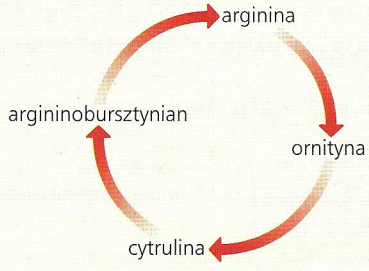
A. Po obu stronach wewnętrznej błony mitochondrium powstaje różnica stężeń protonów.
B. Przepływ protonów przez syntazę ATP napędza tworzenie ATP.
C. Protony są przenoszone przez błonę podczas transportu elektronów (np. pochodzących z rozkładu związków organicznych).
D. Syntaza ATP odpowiada za tworzenie jedynie około 25% ATP komórki; większość ATP powstaje podczas fosforylacji substratowej.

Zadanie 9. (1 pkt)

Podaj nazwę związku, który przenosi resztę aminową między mięśniami a wątrobą.

Zadanie 10. (2 pkt)

Poniższy schemat przedstawia zasadniczą część jednego z cykli przemian metabolicznych.



Podaj nazwę tego cyklu i określ, jakie znaczenie ma on dla zwierząt lądowych.

Fotosynteza

Zadanie 1. (1 pkt)

Podaj nazwę pierwiastka, którego atomy w układzie porfirynowym chlorofilu są odpowiednikiem żelaza zawartego w hemie.

Zadanie 2. (3 pkt)

Podaj nazwę barwników, które nadają liściom pomarańczowy i żółty kolor, oraz wymień funkcje, jakie pełnią one w tych organach. Wyjaśnij, dlaczego jesienią liście zmieniają barwę z zielonej na żółtą lub pomarańczową.

Zadanie 3. (1 pkt)

Poniżej zapisano ogólną reakcję fotosyntezy. **Określ, jaką liczbę zastąpiono literą A, oraz podaj nazwę związku chemicznego zastąpionego literą B.**

A CO_2 + **A** H_2O + energia świetlna → **B** + **A** O_2

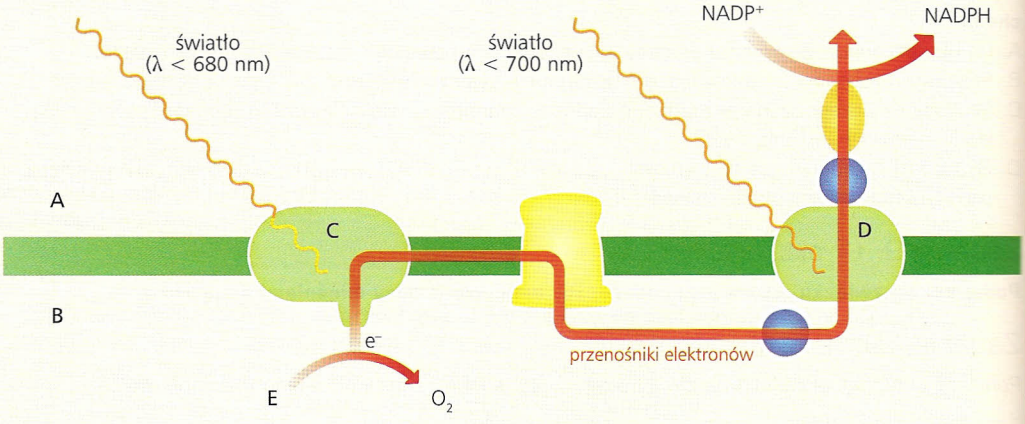
Zadanie 4. (1 pkt)

Wśród wymienionych niżej procesów wskaż ten, który nie jest przyczyną powstawania siły protonomotorycznej podczas jasnej fazy fotosyntezy.

A. fotoliza wody
B. sprzężony z przepływem elektronów transport protonów przez błonę tylakoidu
C. synteza ATP
D. redukcja $NADP^+$

Zadanie 5. (2 pkt)

Na ilustracji przedstawiono schemat fazy jasnej fotosyntezy.



Do oznaczeń literowych na rysunku dopasuj pojęcia i związki chemiczne spośród wymienionych poniżej.

H_2O, CO_2, fotosystem I, fotosystem II, wnętrze tylakoidu, stroma chloroplastu

Zadanie 6. (2 pkt)

Wśród podanych związków wskaż te, które są składnikami tak zwanej siły asymilacyjnej.

NAD^+, NADPH, ATP, CoA, $FADH_2$, GTP

Zadanie 7. (3 pkt)

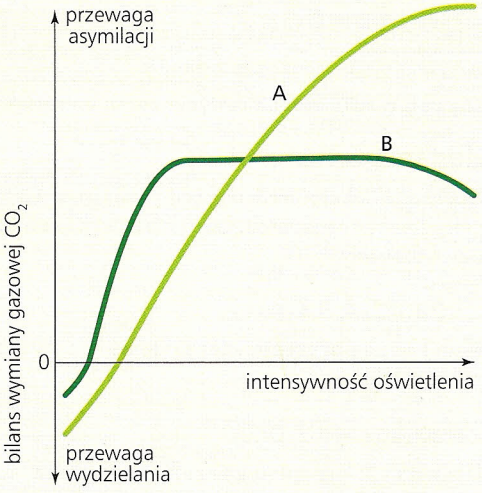
Uzupełnij luki w poniższym tekście.

Faza ciemna fotosyntezy jest inaczej określana jako ..... Najważniejszy spośród enzymów biorących w niej udział to ..... Odpowiada on za włączanie ..... do związków organicznych. Przy niedoborze tego związku dochodzi do przyłączania ..... i częściowego rozpadu związku organicznego. Jest to proces określany jako .....

Zadanie 8. (2 pkt)

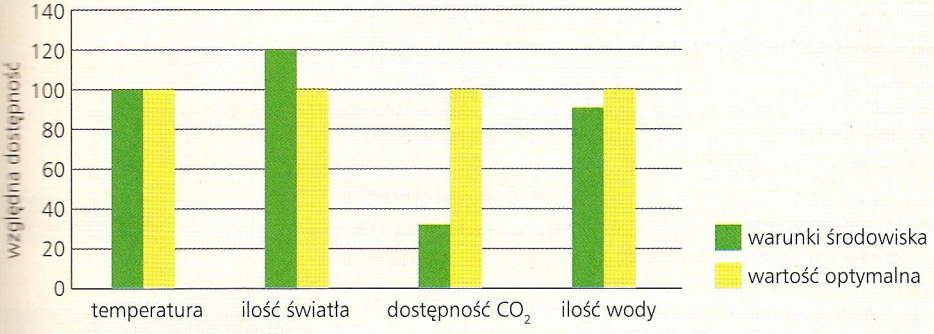
Na wykresie przedstawiono zależność bilansu wymiany gazowej dwóch roślin od natężenia oświetlenia.

Określ, która z roślin (A czy B) jest rośliną cieniolubną. Zaznacz na wykresie jej świetlny punkt kompensacyjny.



Zadanie 9. (3 pkt)

Na wykresie przedstawiono warunki panujące w pewnym środowisku w odniesieniu do warunków optymalnych dla przeprowadzania fotosyntezy.



Określ, który typ fotosyntezy (C_3, C_4, CAM) będzie najwydajniejszy w środowisku porównywanym do optymalnego. Odpowiedź uzasadnij.

Zadanie 10. (1 pkt)

Uszereguj wymienione grupy chemoautotrofów od najbardziej do najmniej wydajnych energetycznie (biorąc pod uwagę ilość energii, którą uzyskują z typowych dla nich substratów chemosyntezy).

bakterie nitryfikacyjne, bakterie siarkowe, bakterie żelazowe

Fizjologia roślin

Zadanie 1. (2 pkt)

W pewnym miejscu potencjał wody Ψ_w w glebie jest równy –0,1 MPa, natomiast potencjał wody w korzeniach rośliny wynosi –1,1 MPa.

Określ, w którą stronę będzie przepływać woda – z gleby do korzeni czy z korzeni do gleby. Odpowiedź uzasadnij.

Zadanie 2. (2 pkt)

W miejscu opisanym w zadaniu 1. została rozsypana duża ilość soli kuchennej.

Określ, w jaki sposób wpłynie to na kierunek przepływu wody. Odpowiedź uzasadnij.

Zadanie 3. (3 pkt)

Sporządź tabelę porównującą transport wody i substancji organicznych w roślinie. Uwzględnij takie cechy transportu, jak: kierunek, typ tkanki przewodzącej oraz czy jest to transport bierny, czy – aktywny.

Zadanie 4. (1 pkt)

Podaj nazwę procesu, który odpowiada za wypływanie wiosną cieczy z uszkodzonych bezlistnych gałęzi brzozy.

Zadanie 5. (2 pkt)

Uzupełnij tekst opisujący rolę organizmów symbiotycznych w odżywianiu roślin.

Jednym z najważniejszych pierwiastków jest ..... Niektóre rośliny uzyskują go dzięki symbiozie z ....., występującymi w specjalnych brodawkach korzeniowych. Dla większości roślin ważna jest też symbioza z grzybami, określana jako ..... Pozwala ona na znacznie wydajniejsze pobieranie ..... i soli mineralnych z gleby.

Zadanie 6. (2 pkt)

Przyporządkuj opisy ruchów roślin (kolumna I) do ich nazw (kolumna II).

I	II
A. inaczej ruch senny, uwarunkowany wewnętrznymi rytmami rośliny	1. fototropizm
B. kierunkowa reakcja na dotyk (umożliwiająca np. owijanie się rośliny wokół podpory)	2. fotonastia
C. bezkierunkowa reakcja na światło (powodująca np. otwieranie i zamykanie kwiatów)	3. geotropizm
D. kierunkowa reakcja na siłę ciążenia (regulująca np. kierunek wzrostu korzeni)	4. nyktynastia
	5. tigmotropizm

Zadanie 7. (2 pkt)

Niektóre rośliny, zanim zakwitną, muszą przeżyć okres chłodu. Dopóki to nie nastąpi, do kwitnienia nie dojdzie (mimo odpowiedniej długości dnia i nocy).

Podaj nazwę opisanego mechanizmu inicjacji kwitnienia roślin. Określ, jak nazywa się rośliny uprawne (np. zboża), wymagające tego typu inicjacji.

Zadanie 8. (2 pkt)

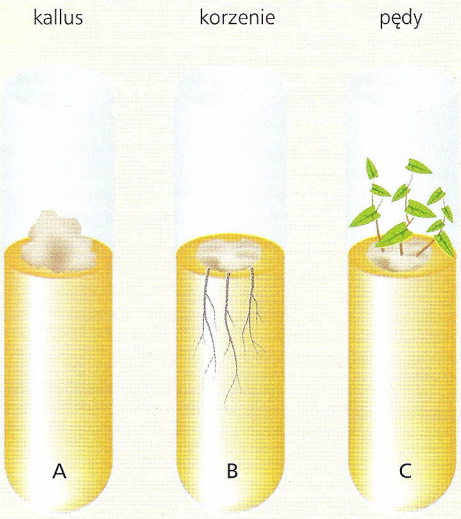
W poniższej tabeli zaznacz, czy określony bodziec będzie powodował otwieranie (+), czy – zamykanie (–) aparatów szparkowych.

Typ bodźca	Reakcja aparatów szparkowych
wysokie stężenie kwasu abscysynowego (ABA) w komórkach szparkowych	
niskie stężenie dwutlenku węgla	
intensywne oświetlenie	
niedobory wody w sąsiedztwie aparatu szparkowego	

Zadanie 9. (2 pkt)

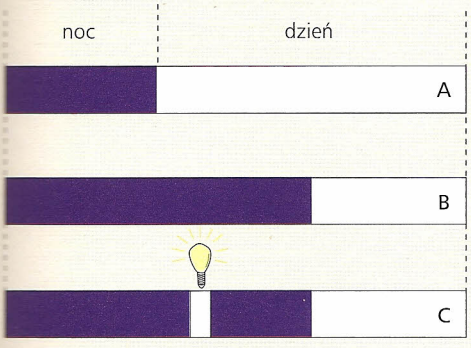
Na ilustracji przedstawiono wpływ hormonów na różnicowanie się organów rośliny.

Określ, w którym przypadku (A, B lub C) występuje wysokie stężenie auksyn i niskie cytokinin, a w którym – wysokie stężenie cytokinin i niskie auksyn.



Zadanie 10. (3 pkt)

Na ilustracji przedstawiono różne warunki oświetlenia w ciągu doby.

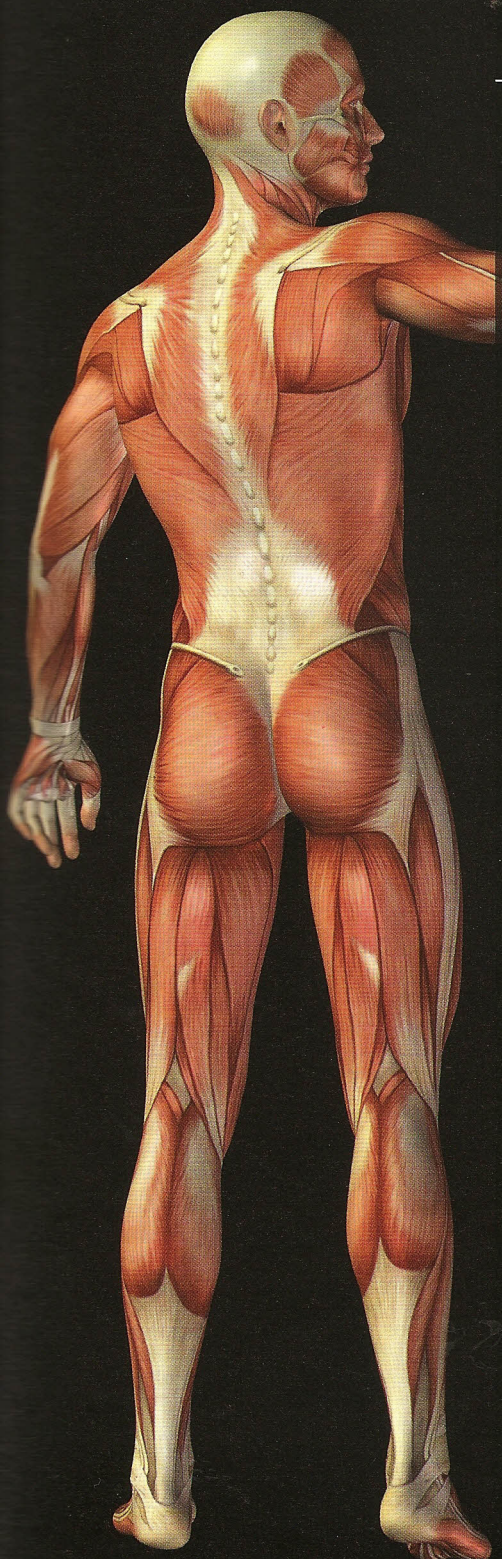


Określ, jakie rośliny – dnia długiego czy dnia krótkiego – zakwitną w każdej z zaprezentowanych sytuacji (A, B i C).

Zadanie 11. (1 pkt)

Wyjaśnij, dlaczego u roślin nasiennych nie występują taksje.





BUDOWA I FUNKCJONOWANIE ORGANIZMU CZŁOWIEKA

22 | Układy narządów człowieka i ich tkankowa budowa
23 | Homeostaza organizmu człowieka
24 | Czynniki zaburzające homeostazę
25 | Budowa szkieletu człowieka
26 | Mechanizm skurczu mięśnia
27 | Główne grupy mięśni
28 | Energia i aktywność fizyczna
29 | Składniki pokarmowe – ich rola i źródła
30 | Budowa układu pokarmowego
31 | Zapotrzebowanie energetyczne organizmu
32 | Budowa układu oddechowego
33 | Mechanizm wymiany gazowej
34 | Zaburzenia funkcjonowania układu oddechowego
35 | Budowa układu krwionośnego
36 | Funkcje krwi
37 | Choroby układu krwionośnego
38 | Elementy układu odpornościowego
39 | Reakcje odpornościowe
40 | Zaburzenia funkcji układu odpornościowego
41 | Budowa układu wydalniczego
42 | Mechanizm powstawania moczu
43 | Choroby nerek
44 | Budowa układu nerwowego
45 | Proces powstawania impulsu nerwowego
46 | Funkcjonowanie układu nerwowego oraz łuk odruchowy
47 | Higiena układu nerwowego i znaczenie snu
48 | Mechanizm percepcji bodźców. Budowa narządu wzroku
49 | Budowa narządu słuchu
50 | Narząd równowagi, zmysł smaku i węchu
51 | Zasady higieny narządu wzroku i słuchu
52 | Budowa i funkcje skóry
53 | Choroby skóry i profilaktyka
54 | Budowa układu hormonalnego
55 | Klasyfikacja hormonów
56 | Rola sprzężeń zwrotnych w układzie hormonalnym
57 | Regulacja hormonalna
58 | Budowa żeńskiego i męskiego układu rozrodczego
59 | Proces oogenezy i spermatogenezy
60 | Cykl menstruacyjny i fizjologia procesu zapłodnienia
61 | Fazy rozwoju zarodka i płodu
62 | Ontogeneza człowieka
63 | Planowanie rodziny

22. Układy narządów człowieka i ich tkankowa budowa

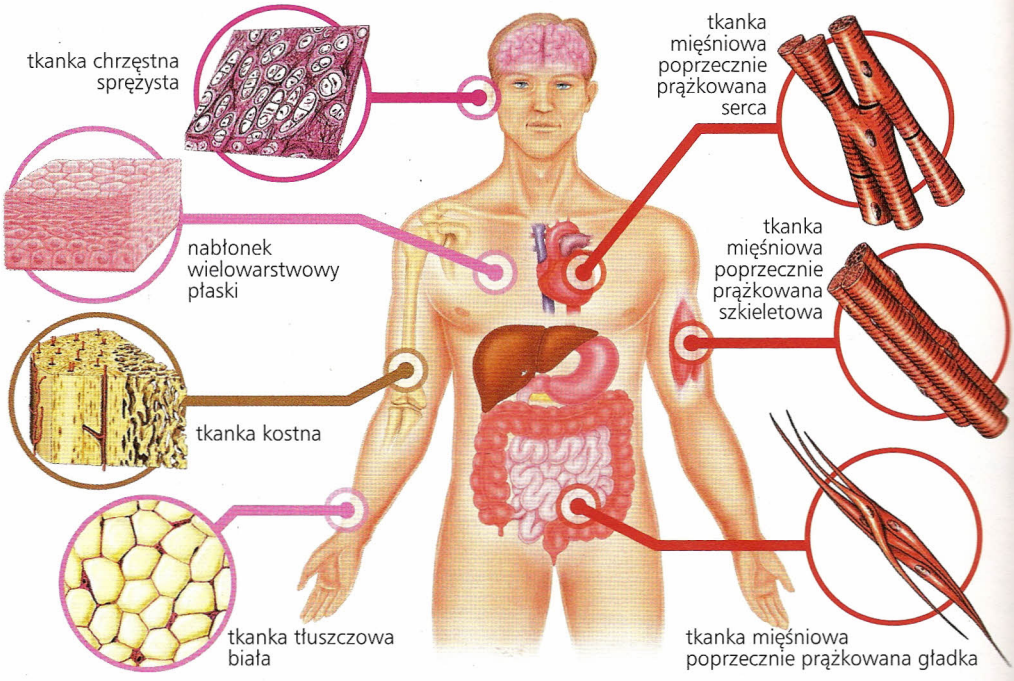
Charakterystyczną cechą materii ożywionej jest jej **hierarchiczna budowa**. Oznacza to, że każdy żywy organizm składa się z wielu poziomów strukturalnych, z których bardziej złożone są tworzone przez struktury niższego rzędu. Najniżej w hierarchii znajdują się pojedyncze atomy. Tworzą one cząsteczki, które budują z kolei związki wielkocząsteczkowe (węglowodany, białka, tłuszcze, kwasy nukleinowe). Dopiero z nich tworzone są tkanki, narządy, układy narządów, a wreszcie – cały organizm.

Budowa ciała człowieka

Organizm człowieka jest strukturą niezwykle złożoną, zbudowaną z olbrzymiej liczby komórek, która według niektórych źródeł może wynosić nawet od 50 do 75 bilionów! Komórki o zbliżonej budowie i fizjologii grupują się w tkanki, a te z kolei tworzą narządy (22.1.).

Badaniem budowy i funkcji poszczególnych narządów występujących w ciele człowieka zajmują się ściśle ze sobą powiązane dziedziny wiedzy – anatomia i fizjologia. Nie sposób bowiem opisać funkcje i procesy zachodzące w danym narządzie (np. w nerkach) bez uwzględnienia jego budowy anatomicznej. Podstawą nauki anatomii jest poznanie lokalizacji najważniejszych narządów umiejscowionych w czterech głównych jamach ciała: jamie **czaszkowej**, jamie **klatki piersiowej**, jamie **brzusznej** oraz jamie **miednicowej**.

? Wymień charakterystyczne cechy czterech typów tkanek spotykanych u człowieka.



22.1. Przykładowa lokalizacja wybranych tkanek w ciele człowieka

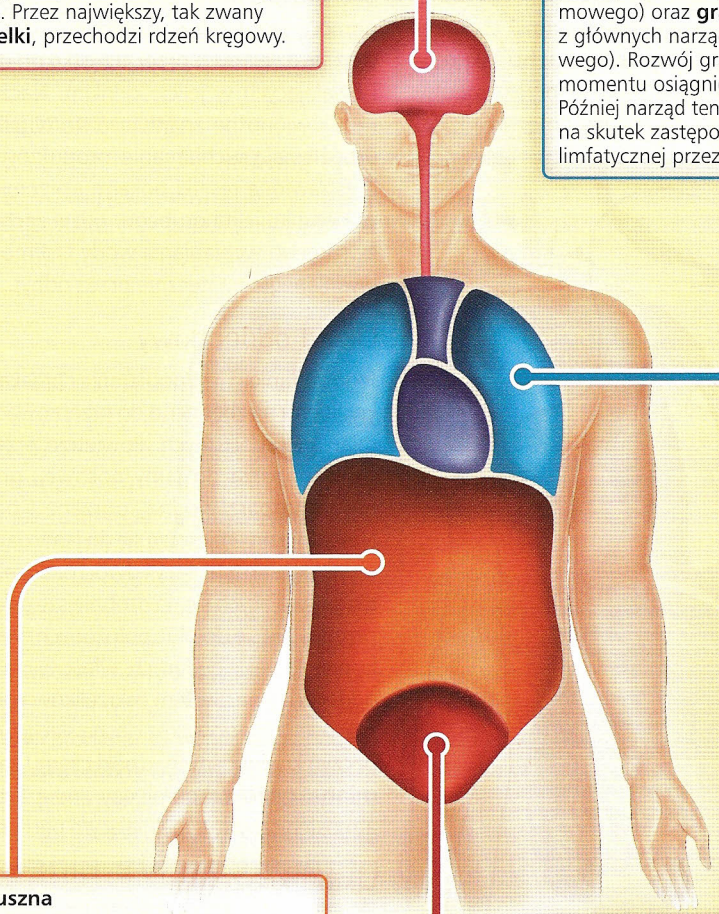
ROZMIESZCZENIE NARZĄDÓW WEWNĘTRZNYCH W OBRĘBIE JAM CIAŁA

Jama czaszki

Jej wnętrze niemal całkowicie wypełnia mózg, który szybko powiększa się od momentu narodzin i wpływa na kształt czaszki (dzięki elastycznym połączeniom tworzących ją kości). Poza mózgiem wewnątrz czaszki mieszczą się także mniejsze przestrzenie – jama nosowa i jamy zatok. W podstawie czaszki znajdują się otwory, przez które przebiegają naczynia krwionośne i nerwy czaszkowe. Przez największy, tak zwany **otwór wielki**, przechodzi rdzeń kręgowy.

Jama klatki piersiowej

Jest dużą przestrzenią, której wielkość wyznaczają żebra oraz przepona. Znajdują się w niej dwa najważniejsze narządy ciała – **płuca** i **serce**. Odpowiadają one za pobieranie tlenu i dostarczanie go za pośrednictwem krwi do wszystkich tkanek ciała oraz za usuwanie z nich dwutlenku węgla. Poza płucami i sercem w jamie klatki piersiowej znajdują się również **przełyk** (stanowiący część przewodu pokarmowego) oraz **grasica** (będąca jednym z głównych narządów układu odpornościowego). Rozwój grasicy przebiega aż do momentu osiągnięcia dojrzałości płciowej. Później narząd ten zaczyna stopniowo zanikać na skutek zastępowania tworzącej go tkanki limfatycznej przez tkankę tłuszczową.



Jama brzuszna

Pod względem wielkości jest porównywalna z jamą klatki piersiowej. Rozciąga się od przepony aż po okolice jamy miednicowej. Mieszczą się w niej narządy kluczowe dla funkcjonowania organizmu. Są to przede wszystkim elementy układu pokarmowego: **żołądek**, **jelito cienkie**, część **jelita grubego**, a także dodatkowe gruczoły trawienne: **trzustka** i **wątroba**. W jamie brzusznej zlokalizowane są również **nerki** stanowiące główne elementy układu wydalniczego.

Jama miednicowa

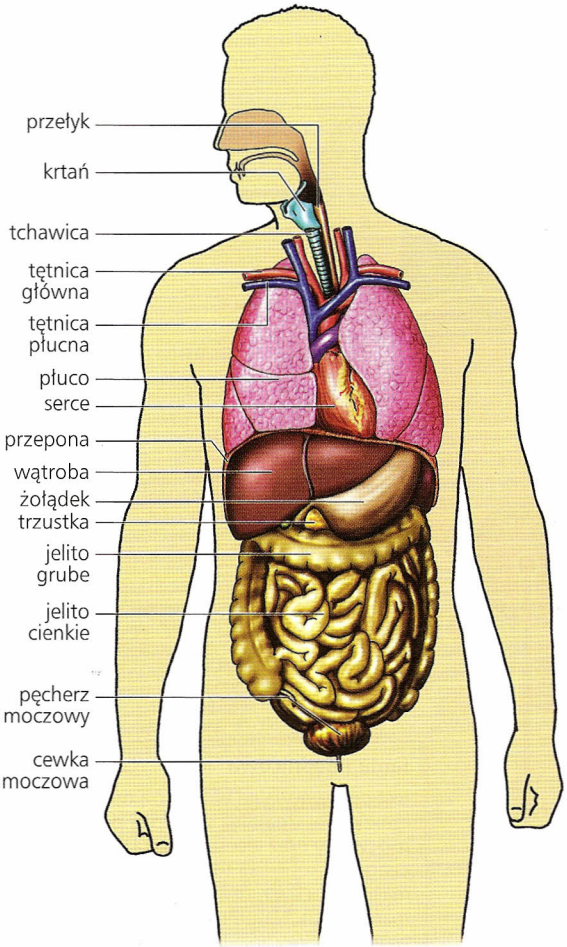
Jest porównywalna wielkością do jamy czaszkowej. Znajdują się w niej **pęcherz moczowy** oraz elementy **układu rozrodczego**. U kobiet są to: jajniki, jajowody, macica, pochwa, czyli większość narządów rozrodczych. Natomiast u mężczyzn część tych narządów znajduje się poza organizmem (jądra, najądrza oraz fragmenty nasieniowodów umieszczone w mosznie).

Układy narządów człowieka i ich tkankowa budowa

Kluczem do poznania i zrozumienia złożoności organizmu człowieka jest wiedza na temat budowy i funkcjonowania **narządów** połączonych w sprawnie działające **układy** (22.2.).

Układ narządów ruchu

Ruch ciała człowieka jest możliwy dzięki mięśniom szkieletowym. Są one zdolne do skurczu i stanowią **czynne** elementy **aparatu ruchu**. Podporą są dla nich kości (niezdolne do poruszania się), będące wraz z więzadłami i stawami **biernymi** elementami **aparatu ruchu**. Skurcze mięśni szkieletowych, wywołane przez impulsy nerwowe, prowadzą do zmiany położenia kości względem siebie. Tak powstaje ruch.



22.2. Topograficzne rozmieszczenie narządów wewnętrznych człowieka

Układ trawienny

Do podtrzymania wszystkich funkcji życiowych niezbędna jest obecność złożonego układu trawiennego. Układ ten ma postać długiej drożnej cewki o długości kilku metrów, do której uchodzą liczne narządy uczestniczące w procesie trawienia. Wyróżnia się dwa etapy tego procesu: **trawienie mechaniczne**, polegające na rozdrabnianiu pokarmu, oraz **trawienie chemiczne**, odbywające się za pomocą enzymów zawartych w soku żołądkowym oraz wydzielanych przez trzustkę do dwunastnicy i działających w jelicie cienkim. Naczynia chłonne i krwionośne znajdujące się w jelicie cienkim umożliwiają wchłanianie produktów trawienia. Niestrawione resztki pokarmu przemieszczają się w kierunku jelita grubego, gdzie zachodzi proces zwrotnego wchłaniania wody i formowania kału, wydalanego ostatecznie przez odbyt.

Układ oddechowy

Jego zadaniem jest pobieranie i przekazywanie do krwi tlenu niezbędnego do przeprowadzania przemian metabolicznych. Powietrze przedostaje się przez nozdrza do jamy nosowej, gdzie zostaje nasycone parą wodną, ogrzane i oczyszczone. Następnie przemieszcza się do jamy gardła, a stamtąd do krtani, tchawicy i dwóch oskrzeli głównych, rozgałęziających się na drobniejsze oskrzeliki. Stąd przedostaje się do płuc położonych wewnątrz klatki piersiowej i będących właściwymi narządami oddechowymi. System oskrzelików i pęcherzyków płucnych opleciony jest ciasną siecią włosowatych naczyń krwionośnych, dzięki czemu zachodzi **wymiana gazowa** pomiędzy krwią a powietrzem atmosferycznym wypełniającym pęcherzyki płucne.

Układ krążenia

Odpowiada za dostarczanie tlenu, organicznych substancji odżywczych, związków nieorganicznych i witamin do komórek organizmu. **Układ krwionośny** bierze też udział w usuwaniu powstających w komórkach szkodliwych produktów przemiany materii (dwutlenku węgla i związków azotowych). Sprawne działanie całego systemu zapewniają zróżnicowane pod względem funkcji naczynia krwionośne oraz czterojamiste serce.

Obecność pełnej przegrody międzykomorowej w sercu człowieka i innych ssaków pozwala na wyróżnienie dwóch odrębnych obiegów krwi: małego (płucnego) oraz dużego (obwodowego).

Z układem krwionośnym wiąże się nierozerwalnie **układ limfatyczny**, odpowiadający głównie za regulację ilości płynów ustrojowych oraz reakcje odpornościowe. Tworzą go naczynia limfatyczne, w których krąży płyn zbliżony składem do osocza. Jest to tak zwana **chłonka** (**limfa**). W trakcie przemieszczania się w naczyniach limfatycznych chłonka przepływa przez liczne węzły chłonne. Znajdują się w nich komórki odpornościowe, które likwidują patogeny dzięki obecności limfocytów.

Układ odpornościowy

Układ ten warunkuje sprawną **ochronę organizmu** przed wnikającymi do niego z zewnątrz czynnikami zakaźnymi (np. bakteriami, wirusami, grzybami). Potrafi również rozpoznawać i unieszkodliwiać pojawiające się w organizmie komórki nowotworowe.

Układ moczowo-płciowy

Układ ten składa się z dwóch części: **układu wydalniczego** (moczowego) oraz **układu rozrodczego** (płciowego). Zadaniem układu wydalniczego jest usunięcie zbędnych produktów **przemiany materii** z organizmu. Najważniejszą rolę w tym procesie odgrywają nerki, w których zachodzi filtracja krwi, prowadząca do powstania **moczu pierwotnego**. Na skutek procesu zwanego resorpcją zwrotną większość wody i potrzebnych organizmowi składników zostaje z powrotem wchłonięta. W wyniku tego zagęszczony **mocz ostateczny** zawiera jedynie zbędne produkty przemiany materii, gotowe do usunięcia poza organizm za pośrednictwem pęcherza moczowego i cewki moczowej. Natomiast głównym zadaniem układu rozrodczego jest **produkcja gamet**. W wyniku zapłodnienia dochodzi do powstania zygoty, która po wielu podziałach przekształca się w wielokomórkowy zarodek. U człowieka cały **rozwój zarodka** przebiega wewnątrz organizmu matki – w macicy, silnie umięśnionym narządzie położonym w jamie miednicy.

Układ nerwowy

Odgrywa nadrzędną rolę regulatorową względem innych układów narządów. Najważniejszą jego funkcją jest odbieranie i analizowanie informacji napływających ze środowiska oraz reagowanie na te dane. Część układu nerwowego zwana korą mózgową jest również siedliskiem świadomości oraz powiązanych z nią czynności psychicznych. Pod względem anatomicznym układ nerwowy dzieli się na **ośrodkowy** (centralny) oraz **obwodowy**. Pierwszy z nich zbudowany jest z mózgowia oraz rdzenia kręgowego. Natomiast na drugi składają się nerwy czaszkowe powiązane z mózgowiem (12 par) oraz z rdzeniem kręgowym (31 par).

Układ hormonalny (dokrewny)

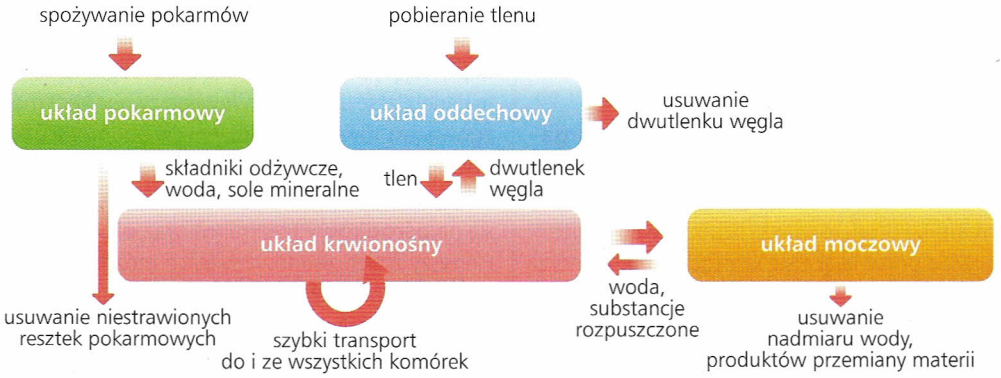
Układ dokrewny stanowi obok układu nerwowego najważniejszy ośrodek odpowiedzialny za utrzymanie stałych parametrów środowiska wewnętrznego. Głównymi elementami tego układu są **gruczoły wydzielania wewnętrznego** (**gruczoły dokrewne**). Wprowadzają one produkowane przez siebie substancje – **hormony** – bezpośrednio do krwi. Hormony charakteryzują się dużą aktywnością biologiczną już w niewielkim stężeniu i wpływają na istotne procesy życiowe (jak np. wzrost, tempo metabolizmu, popęd płciowy).

Powiązania strukturalne i funkcjonalne między narządami i układami

Poznanie roli poszczególnych układów narządów to za mało, by uzyskać pełen obraz funkcjonowania organizmu. Narządy i tworzone przez nie układy nie działają bowiem w oderwaniu od siebie, ale ściśle ze sobą współpracują. Dobrym przykładem tej współpracy jest proces odżywiania. Najpierw organizm musi zdobyć pożywienie. W tym celu wykorzystuje narządy zmysłów (wzrok, węch, słuch) oraz korę mózgową. Pozwala to zaplanować sposób zdobycia pokarmu i ocenić ryzyko związane ze zjedzeniem go (w razie gdyby zawierał trujące substancje lub ochronne elementy budowy, jak pancerze, kolce). Dopiero po pozytywnej analizie dokonanej przez układ nerwowy może zostać podjęta decyzja o opłacalności ataku, schwytaniu zdobyczy i jej zjedzeniu.

Wygląd, zapach oraz smak pokarmu powodują wydzielanie enzymów trawiennych w przewodzie pokarmowym. Dzięki temu, po wstępnej mechanicznej obróbce pożywienia, może zajść właściwe trawienie i wchłanianie. Uzyskane w ten sposób substancje są następnie dostarczane za pośrednictwem układu krwionośnego do wszystkich komórek ciała. Komórki podtrzymują funkcje fizjologiczne, odzyskując zmagazynowaną w pokarmie energię użyteczną chemicznie. Aby do tego doszło, potrzebny jest tlen dostarczany za pośrednictwem układu oddechowego i krwionośnego. Z kolei toksyczne produkty przemiany materii (związki azotowe i dwutlenek węgla) muszą zostać usunięte z ustroju. Odbywa się to za pośrednictwem układu krwionośnego, transportującego wymienione związki do właściwych narządów wydalniczych, czyli płuc i nerek **(22.3.)**.

? Które z wymienionych na ilustracji układów pełnią poza swoimi fizjologicznymi funkcjami także funkcje wydalnicze?



22.3. Przykład współpracy pomiędzy niektórymi układami narządów w ciele człowieka

PODSUMOWANIE

- Ciało dorosłego człowieka składa się od 50 do 75 bilionów wyspecjalizowanych komórek.
- Komórki tworzą organy zlokalizowane w czterech jamach ciała: jamie czaszkowej, jamie klatki piersiowej, jamie brzusznej oraz jamie miednicy.
- Współpracujące ze sobą narządy tworzą funkcjonalne układy, takie jak: trawienny, oddechowy, krwionośny i limfatyczny, odpornościowy, moczowo-płciowy, nerwowy i hormonalny oraz układ ruchu.
- Wszystkie układy organizmu są ze sobą powiązane funkcjonalnie i strukturalnie.

ZADANIA

1. Współpracujące ze sobą układy narządów tworzą funkcjonalny organizm. Spróbuj określić kolejne, ponadorganizmalne poziomy organizacji życia oraz wskazać, jakie dziedziny wiedzy zajmują się ich poznawaniem.
2. Zaproponuj sposób, w jaki zostają uruchomione poszczególne układy organizmu w sytuacji nagłego zagrożenia zdrowia lub życia spowodowanego np. atakiem niebezpiecznego zwierzęcia.
3. Resorpcja zwrotna to proces wchłaniania wody z moczu pierwotnego w kanalikach nefronu. Oceń, w jakich warunkach najczęściej dochodzi do nasilenia tego procesu.

BIBLIOGRAFIA

- Gołąb B., Traczyk W., *Anatomia i fizjologia człowieka*, Ośrodek Doradztwa i Szkolenia TUR, Łódź 1997.
- Michajlik A., Ramotowski W., *Anatomia i fizjologia człowieka*, PZWL, Warszawa 2009.

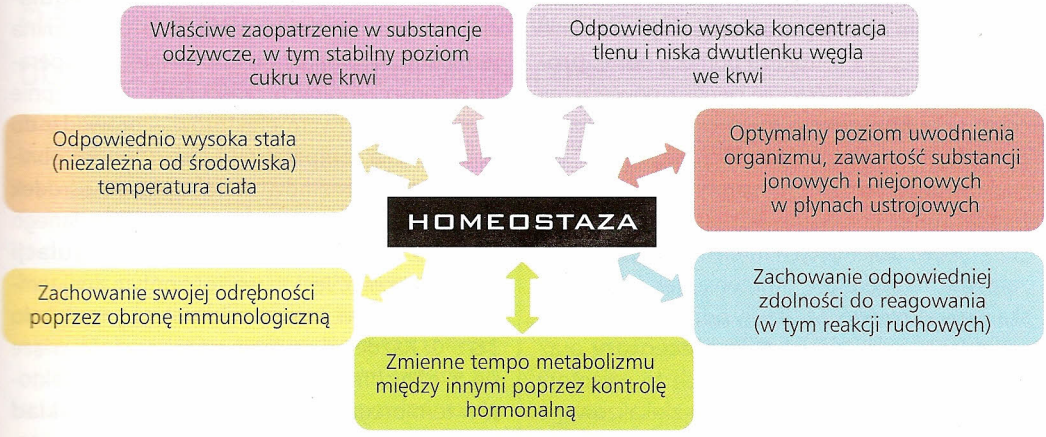
23. Homeostaza organizmu człowieka

Wszystkie procesy zachodzące w żywym organizmie wymagają względnie stałych warunków środowiska wewnętrznego, takich jak: temperatura, objętość płynów ustrojowych, zawartość cukru we krwi oraz jej pH i ciśnienie. Oznacza to, że aby organizm mógł sprawnie funkcjonować, parametry te mogą zmieniać się jedynie w niewielkim przedziale (czyli **zakresie tolerancji**). Zbyt duże ich wahania, spowodowane wpływem środowiska zewnętrznego, mogłyby doprowadzić do zaburzeń w funkcjonowaniu organizmu, a nawet do jego śmierci. Aby temu zapobiec i utrzymać wymienione parametry na względnie stałym poziomie, organizmy żywe wykształciły w toku ewolucji szereg mechanizmów adaptacyjnych – **fizjologicznych** oraz **behawioralnych** (związanych z zachowaniem osobnika).

Współczesna definicja homeostazy

Termin **homeostaza** pochodzi z języka greckiego i w dosłownym tłumaczeniu oznacza „trwanie w podobnym stanie" (*homoíos* – „podobny, równy", *stásis* – „trwanie") **(23.1.)**. Ten stan równowagi wewnętrznej organizmu stale naruszają różne czynniki. Mogą one być pochodzenia zewnętrznego (np. infekcje, złamania kończyn, ukąszenie przez jadowite zwierzęta), jak i wewnętrznego (np. następstwa procesów przemiany materii, zmiany tętna wywołane aktywnością fizyczną). Zdrowy organizm potrafi jednak szybko przywrócić stan homeostazy dzięki swym zdolnościom adaptacyjnym i mechanizmom odpornościowym.

Mechanizmy homeostazy są podstawowymi cechami żywych istot. Bez nich takie właściwości organizmu, jak temperatura, zasolenie, kwasowość, poziom hormonów czy stężenia gazów i składników odżywczych szybko przekroczyłyby zagrażającą życiu granicę. W zdrowym ciele mechanizmy homeostatyczne działają automatycznie na różnych poziomach – od procesów metabolicznych zachodzących w obrębie pojedynczych komórek, aż po regulację na poziomie całego organizmu. Przykładem tych pierwszych jest kontrola metabolizmu komórki poprzez regulację aktywności enzymów szczegółowo opisana w rozdziale 3. Jednym z omówionych tam działań mechanizmów regulacyjnych (a równocześnie mechanizmów homeostazy) w przemianach metabolicznych jest sprzężenie zwrotne ujemne. Produkt ostatniej reakcji szlaku metabolicznego hamuje aktywność enzymu katalizującego jego pierwszą reakcję, a to pozwala na dopasowanie



23.1. Czynniki wpływające na utrzymanie homeostazy

? Jakie czynniki wpływają na zaburzenie równowagi fizycznej i chemicznej organizmu?

aktywności szlaku do zapotrzebowania komórki na jego produkt. Ten mechanizm regulacji działa na poziomie podstawowym i nie wymaga dodatkowych elementów.

Metabolizm komórki musi jednak uwzględniać konieczność zachowania homeostazy na poziomie całego organizmu. Czasem wymusza to znaczną zmianę w działaniu komórki – na przykład rozpoczęcie wydzielania glukozy przez komórkę wątroby, gdy poziom tego cukru we krwi spadnie i zaczyna go brakować w innych organach. Za taką ogólną koordynację odpowiadają układ nerwowy oraz układ dokrewny. Hormony i bodźce nerwowe modyfikują mechanizmy regulacyjne na poziomie komórkowym, w wyniku czego zachodzi wyraźna zmiana w działaniu komórki. W efekcie zmian zachodzących w wielu komórkach jest możliwe utrzymanie homeostazy na poziomie organizmu – przykładowo gdy jest konieczna reakcja na nagłą zmianę w środowisku. Co ciekawe, regulacja hormonalna również często wykorzystuje mechanizm sprzężeń zwrotnych (więcej na ten temat w rozdziale 56.). Zatem ogólny mechanizm homeostazy jest w tym przypadku bardzo podobny zarówno na poziomie komórki, jak i na poziomie całego organizmu.

Kontrolę nad przebiegiem większości procesów homeostatycznych sprawuje niewielka część międzymózgowia zwana podwzgórzem. To właśnie za jej pośrednictwem utrzymywane są stałe parametry środowiska wewnętrznego. Wykorzystywane są tu oba wspomniane wcześniej układy: szybka droga nerwowa (z udziałem autonomicznego układu nerwowego) oraz powolna droga hormonalna. Podwzgórze odgrywa też istotną rolę w regulacji rytmów dobowych snu i czuwania (współdziałając z szyszynką).

Znaczący wpływ na zachowanie homeostazy ustroju mają między innymi takie mechanizmy, jak: (1) utrzymywanie temperatury ciała na stałym poziomie (izotermia) i (2) utrzymywanie fizjologicznych objętości płynów ustrojowych **(23.1.)**.

Procesy termoregulacyjne ustroju

Termoregulacja pozwala na utrzymanie bilansu cieplnego ustroju. Jest to możliwe dzięki zachowaniu proporcji pomiędzy ilością ciepła wytworzonego w procesach metabolicznych i energią cieplną wymienioną między organizmem a środowiskiem. U wszystkich organizmów stałocieplnych termoregulacja jest jednym z najistotniejszych mechanizmów. Do najważniejszych fizycznych procesów rządzących wymianą ciepła między organizmem a otoczeniem należą: **parowanie** (czyli usuwanie nadmiaru ciepła z ustroju za pomocą potu), **promieniowanie** (emitowanie ciepła z powierzchni ciała) oraz **konwekcja** (ruch cieczy lub gazów powodujący wyrównanie temperatury).

Aby organizm mógł sprawnie regulować temperaturę, konieczne jest istnienie systemu „czujników" zbierających informacje o zmianach zarówno temperatury otoczenia, jak i środowiska wewnętrznego. Struktury odpowiedzialne za to zadanie dzieli się na **termoreceptory** oraz **termodetektory**. Pierwsze z nich to receptory zimna i receptory ciepła. Są one zlokalizowane głównie w skórze właściwej.

Informacja odbierana przez termoreceptory dociera zarówno do ośrodkowego centrum termoregulacji w podwzgórzu, jak i do kory mózgowej świadomości. Umożliwia to podjęcie świadomych działań mających na celu wsparcie procesów termoregulacyjnych (np. ubranie cieplejszej odzieży w chłodne dni lub znalezienie schronienia przed zimnem).

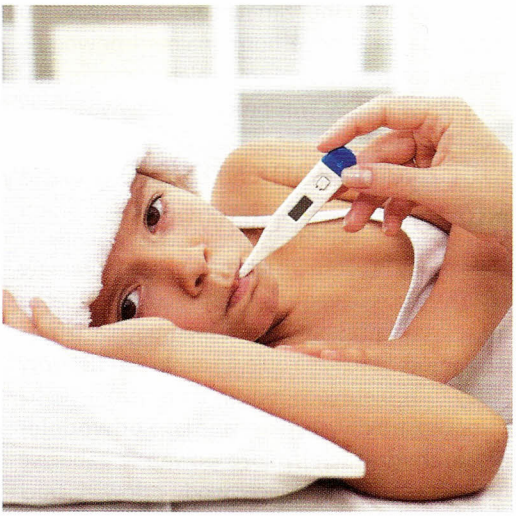
Drugim rodzajem „czujników" termicznych są termodetektory zlokalizowane głównie w podwzgórzu. Tworzą one **ośrodek termoregulacji**, którego mechanizm działania przypomina termostat. Gromadzi on informacje o temperaturze poszczególnych części ciała, a następnie – za pośrednictwem efektorów – prowadzi do podniesienia temperatury ustroju lub jej obniżenia. U organizmów stałocieplnych ośrodek termoregulacji ma charakterystyczny dla danego gatunku **punkt nastawczy termoregulacji** (ang. *set point*). Jest to wartość optymalnej temperatury ustroju, która u człowieka wynosi około 36,6°C. Każde od chylenie od tej wartości wiąże się z natychmiastowym pobudzeniem efektorów termoregulacyjnych. Należą do nich: **układ krwionośny**, **gruczoły potowe** zlokalizowane w skórze, **tkanka tłuszczowa**, **mięśnie szkieletowe** oraz **wątroba**.

Reakcje termoregulacyjne w sytuacji podwyższenia temperatury ustroju

Organizm bardzo szybko reaguje na wzrost temperatury, bez względu na to, czy wynika on z procesów wewnętrznych (jak intensywna praca mięśni), czy – z warunków zewnętrznych (jak np. wysoka temperatura otoczenia). Gdy temperatura krwi przepływającej przez podwzgórze wzrośnie powyżej 37,5°C, pobudzone termodetektory uruchamiają fizjologiczne mechanizmy prowadzące do utraty ciepła. Polegają one głównie na rozszerzaniu naczyń krwionośnych w skórze, wydzielaniu potu oraz przyspieszeniu akcji oddechowej. W wyniku rozszerzenia naczyń ogrzana krew płynie możliwie blisko powierzchni skóry, oddając tą drogą duże ilości ciepła. Proces ten jest wspomagany przez intensywne pocenie się, zachodzące dzięki gruczołom potowym (ich ilość w skórze waha się od 2 do 5 mln). Ocenia się, że 1 litr potu odprowadza z organizmu nawet 600 kilokalorii ciepła, ale należy pamiętać, że jednocześnie tracone są ważne elektrolity, jak sód, potas czy chlor. Ostatni ze sposobów usuwania nadmiaru ciepła, czyli przyspieszenie wydechów, ma u człowieka raczej marginalne znaczenie.

Gorączka często jest uznawana za chorobę samą w sobie, podczas gdy stanowi jedynie fizjologiczny objaw trwającego procesu chorobowego (**23.2.**). Ponieważ w wyższej temperaturze komórki odpornościowe dzielą się częściej i wydzielają więcej przeciwciał (ok. 10% na 1°C), gorączka ma dla organizmu pozytywne znaczenie. Powoduje również, że spada tempo namnażania się patogenów. Dzieje się tak między innymi w wyniku zmiejszenia się dostępności związków koniecznych do rozwoju bakterii.

? Jakie mogą być pozytywne i negatywne konsekwencje gorączki?



23.2. Gorączka jest przejawem działania fizjologicznych mechanizmów obronnych organizmu.

Reakcje termoregulacyjne w sytuacji obniżenia temperatury ustroju

Przy obniżeniu temperatury krwi ośrodek termoregulacji musi podjąć działania zwiększające tempo wytwarzania ciepła i minimalizujące jego straty. Układ współczulny wydziela **noradrenalinę**, która przyspiesza okresowo metabolizm wszystkich komórek ciała oraz zwęża naczynia krwionośne w skórze właściwej. Zmniejsza to ilości krwi płynącej blisko granicy z naskórkiem, co znacznie ogranicza straty ciepła. Mechanizm ten nie wystarcza jednak do utrzymania odpowiednio wysokiej, stałej temperatury organizmu. Sposobem na szybkie wytworzenie dużej ilości dodatkowego ciepła jest zwiększenie napięcia mięśni szkieleto-

:: Ciekawostka

Niezależnie od działania mechanizmów homeostatycznych temperatura ciała może ulegać wahaniom dobowym. Najniższy poziom osiąga nad ranem, a najwyższy – między godziną 16. a 18. (różnica między skrajnymi wartościami mieści się w przedziale od 0,5 do 1°C). U kobiet na dobowe wahania temperatury mogą nakładać się zmiany ciepłoty ciała związane z przebiegiem cyklu menstruacyjnego.

wych oraz zjawisko **termogenezy drżeniowej**. Dzięki drżeniu mięśni szkieletowych (pod postacią dreszczy) tempo metabolizmu może wzrosnąć nawet pięciokrotnie!

W sytuacjach długotrwałego obniżenia temperatury otoczenia (np. zimą) adaptacja organizmu przebiega na drodze hormonalnej i powoduje zmianę tempa metabolizmu całego ustroju. Najważniejszą rolę w tym procesie odgrywają hormony tarczycy – **tyroksyna** i **trójjodotyronina**. Pobudzenie ich wydzielania również odbywa się za pośrednictwem podwzgórza. Uwalnia ono hormon TRH (**tyreoliberynę**), stymulując leżącą poniżej przysadkę mózgową do produkcji TSH (tyreotropiny). Ta z kolei przez długi czas zwiększa wydzielanie tyroksyny i trójjodotyroniny przez tarczycę. Hormony te przyspieszają tempo metabolizmu niezależnie od umiejscowienia tkanki.

Utrzymywanie fizjologicznych objętości płynów ustrojowych

Ciało osoby w wieku 30 lat i masie 70 kilogramów składa się przeciętnie w 37–55% z wody. Oznacza to, że wewnątrz komórek i w przestrzeniach międzykomórkowych znajduje się około 26–38 litrów wody (u kobiet nieco mniej). Zmniejszenie ilości płynów ustrojowych, określane jako **odwodnienie** (**dehydratacja**), może poważnie zaburzyć funkcje ustroju. Najwięcej wody człowiek traci dziennie wraz z moczem, a także w wyniku pocenia się oraz oddychania. Regulacja ilości wody w organizmie odbywa się na drodze hormonalnej. Informacja o spadku ilości wody we krwi poniżej dopuszczalnego poziomu zostaje odebrana w podwzgórzu. W odpowiedzi na ten sygnał uwalnia ono hormon – **wazopresynę** (nazywaną też **hormonem antydiuretycznym**, **ADH**). Jej zadaniem jest zwiększenie wchłaniania (resorpcji zwrotnej) wody w kanalikach nefronów. Następstwem tego jest produkcja bardziej zagęszczonego moczu, a zatem oszczędność wody. Ponieważ taki stan nie może się utrzymywać zbyt długo, ośrodki pragnienia wywołują serię reakcji zmuszających organizm do aktywnego poszukiwania i uzupełniania płynów.

Czynniki wpływające na wydzielanie ADH

Czynniki zwiększające	Czynniki zmniejszające
• zmniejszenie objętości całkowitej krwi • zmniejszenie ilości przyjmowanych płynów • zwiększone stężenie sodu we krwi • obecność we krwi morfiny i nikotyny	• zwiększenie objętości całkowitej krwi • zwiększenie ilości przyjmowanych płynów • zmniejszone stężenie sodu we krwi • obecność we krwi alkoholu

Mechanizmy regulacji ciśnienia tętniczego krwi

Regulacja ciśnienia tętniczego krwi również jest jednym z mechanizmów homeostazy. Biorą w nim udział hormony, ale głównie odbywa się on na drodze nerwowej, dzięki pracy ośrodka naczynioruchowego zlokalizowanego w **rdzeniu przedłużonym**. Ośrodek ten składa się z dwóch powiązanych ze sobą funkcjonalnie struktur, z których jedna zwęża naczynia krwionośne, a druga je rozszerza.

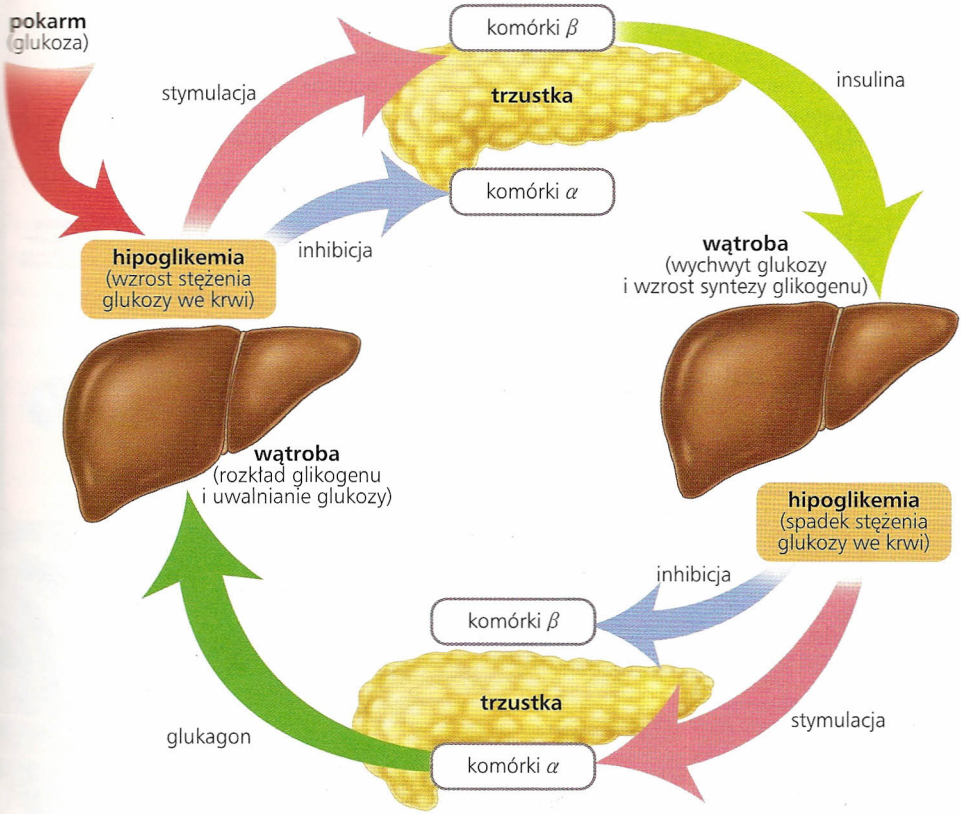
Komórki nerwowe części zwężającej naczynia za pośrednictwem układu współczulnego przekazują impuls do komórek mięśni gładkich w ścianach naczyń krwionośnych. Wydzielana przez te neurony noradrenalina utrzymuje ściany naczyń w stanie ciągłego skurczu, co prowadzi do wzrostu ciśnienia tętniczego. Gdy pobudzona zostanie część rozszerzająca naczynia, dochodzi do hamowania części zwężającej – sygnał docierający do mięśniówki naczyń ulega wytłumieniu, skurcz ustępuje, a ciśnienie krwi maleje.

W sytuacji nagłej utraty dużej ilości krwi (np. wskutek krwotoku) dochodzi do znacznego obniżenia ciśnienia w tętniczkach nerkowych. Ponieważ zbyt duży spadek ciśnienia mógłby skutkować ustaniem filtracyjnej funkcji nerek, grupa komórek sąsiadujących z torebką Bowmana (zwana aparatem przykłębuszkowym) wydziela

do krwi enzym – **reninę**. Dociera on do wątroby, gdzie powoduje uwolnienie krótkiego polipeptydu. Wykazuje on najsilniejsze (spośród wszystkich substancji występujących w ustroju) właściwości powodujące kurczenie naczyń krwionośnych. Na skutek tego drastycznie podwyższa się ciśnienie krwi. Obniżenie ciśnienia krwi ma natomiast charakter miejscowy i jest wywołane działaniem m.in. **histaminy**. Hormon ten powodują rozszerzenie się naczyń krwionośnych i spadek ciśnienia.

Regulacja poziomu glukozy we krwi

Regulacja poziomu cukru we krwi odbywa się głównie za pośrednictwem hormonów trzustkowych. Wytwarzające te hormony komórki α i β zgrupowane są w trzustce w tak zwane **wyspy Langerhansa**. Ich liczba u dorosłego człowieka waha się od 200 tysięcy do 1,8 miliona. Komórki α wytwarzają **glukagon**, a komórki β – **insulinę**. Wzrost stężenia glukozy we krwi przepływającej przez trzustkę powoduje uwolnienie zmagazynowanej w niej insuliny. Dociera ona żyłą wrotną do wątroby, gdzie aktywuje szereg enzymów pobudzających syntezę glikogenu (wątroba wychwytuje glukozę samodzielnie). Insulina ułatwia również przenikanie glukozy do komórek mięśniowych i tłuszczowych. W mięśniach, podobnie jak w wątrobie, zachodzi synteza glikogenu, natomiast w tkance tłuszczowej insulina stymuluje syntezę kwasów tłuszczowych i trójglicerydów. To również prowadzi do obniżenia poziomu glukozy we krwi, co hamuje aktywność wydzielniczą komórek β **trzustki** (**23.3.**). Antagonistycznie wobec insuliny działa glukagon. Stymuluje on uwalnianie glukozy z glikogenu zgromadzonego w wątrobie, co powoduje wzrost poziomu cukru we krwi. Wzrost poziomu cukru we krwi (spowodowany także spożyciem pokarmu) hamuje aktywność wydzielniczą komórek α.



23.3. Schemat regulacji poziomu glukozy we krwi

PODSUMOWANIE

- Kontrolę nad przebiegiem większości procesów służących utrzymaniu homeostazy pełni część międzymózgowia zwana podwzgórzem.
- Najważniejszymi procesami fizycznymi rządzącymi wymianą ciepła między organizmem a otoczeniem są: parowanie, promieniowanie oraz konwekcja.
- Funkcję czujników zbierających informacje o zmianach temperatury otoczenia i krwi pełnią termoreceptory oraz termodetektory.
- Ośrodek termoregulacji u każdego gatunku posiada charakterystyczny punkt nastawczy termoregulacji (ang. *set point*). U człowieka wynosi on około 36,6°C.
- W reakcji na podniesienie temperatury ustroju (powyżej 37,5°C) rozszerzają się naczynia krwionośne w skórze, intensyfikuje się wydzielanie potu oraz rośnie tempo akcji oddechowej.
- Obniżenie temperatury ustroju powoduje zintensyfikowanie działań mających na celu zatrzymanie ciepła wewnątrz ciała oraz zwiększenie tempa metabolizmu.
- Regulacja ilości płynów ustrojowych polega na kontrolowaniu ilości powstającego moczu, intensyfikacji procesu wymiany gazowej oraz pocenia się.
- Regulacja ciśnienia krwi odbywa się za pomocą ośrodka naczynioruchowego zlokalizowanego w rdzeniu przedłużonym.
- Regulacja poziomu glukozy we krwi odbywa się za pomocą dwóch antagonistycznie działających hormonów trzustkowych – insuliny (obniżającej poziom cukru) oraz glukagonu (podwyższającego poziom cukru).

ZADANIA

1. Sklasyfikuj struktury odpowiedzialne za odbieranie informacji o zmianach temperatury otoczenia.
2. Udowodnij, posługując się odpowiednimi argumentami, że gorączka może mieć korzystny wpływ na zwalczanie przez organizm czynników wywołujących infekcje.
3. Omów znaczenie mechanizmu termogenezy drżeniowej w regulacji temperatury ciała.
4. Oceń konsekwencje, jakie może mieć odwodnienie organizmu.
5. Omów rolę reniny oraz określ, gdzie jest wytwarzany ten enzym, a także wyjaśnij znaczenie lokalizacji produkujących go komórek.

BIBLIOGRAFIA

- Chlebińska J., *Anatomia i fizjologia człowieka*, WSiP, Warszawa 1990.
- Martin D., Solomon P. E., Berg L., *Biologia*, Multico Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2007.
- Stamford J., Krótkie wykłady. *Fizjologia człowieka*, PWN, 2008.

W INTERNECIE

- http://www.bioslone.pl/homeostaza
- http://www.innerbody.com/
- http://www.anatomyatlases.org/atlasofanatomy/index.shtml

24. Czynniki zaburzające homeostazę

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) **zdrowie** to nie tylko całkowity brak choroby lub kalectwa, lecz także pełny fizyczny, umysłowy i społeczny dobrostan (rozumiany jako dobre samopoczucie). Nieodzownym warunkiem zdrowia jest homeostaza, będąca dla współczesnej medycyny synonimem dynamicznej równowagi parametrów fizjologicznych organizmu. U osoby zdrowej zmieniają się one w dość wąskim zakresie. O chorobie mówi się wówczas, gdy na skutek działania czynników zewnętrznych lub wewnętrznych parametry homeostatyczne zostają silnie zachwiane, a organizm nie jest w stanie w krótkim czasie samodzielnie przywrócić ich do stanu równowagi.

Czynniki wpływające na zaburzenie homeostazy

Istnieje bardzo wiele czynników mogących powodować zachwianie równowagi homeostatycznej organizmu. Niektóre z tych wymienionych w poniższej tabeli omówiono w dalszej części rozdziału.

Czynniki zaburzające homeostazę			
Biologiczne	**Fizyczne**	**Chemiczne**	**Społeczne**
a) chorobotwórcze: • bakterie • wirusy • pasożyty • toksyny i jad zwierząt • alergeny roślinne i zwierzęce • priony **b) genetyczne**	• ciśnienie atmosferyczne • temperatura powietrza • dostępność wody	• leki i używki • konserwanty • środki ochrony roślin • zanieczyszczenia środowiska	• stres • niehigieniczny tryb życia

Wpływ czynników biologicznych na zaburzenie homeostazy

Najczęściej spotykane choroby bakteryjne, wirusowe i pasożytnicze omówiono w pierwszej części podręcznika (Grabowski S., Kurek A. *Biologia 1. Zakres rozszerzony*, OPERON, Gdynia 2012). Źródłem powodowanych przez nie zakażeń są na ogół chorzy (ludzie lub zwierzęta), a także bezobjawowi nosiciele. **Czynniki chorobotwórcze** rozprzestrzeniają się za pośrednictwem płynów wysiękowych (kaszel, katar), wydzielin (ślina) oraz wydalin (mocz, kał). Mogą się również przedostać do ustroju za pośrednictwem gleby (np. tężec), wody (czerwonka bakteryjna), owadów kłujących (malaria). Patogeny wnikają więc do organizmu różnymi drogami, takimi jak: przewód pokarmowy, droga pozajelitowa, drogi oddechowe oraz moczowo-płciowe.

Wniknięcie patogenów do organizmu nazywamy **infekcją** lub **zakażeniem**, a dalszy przebieg choroby zależy od pokonania przez nie mechanizmów obronnych ustroju. Gdy rozwój organizmów chorobotwórczych zachodzi blisko miejsca ich wniknięcia, mówi się o zakażeniu miejscowym, natomiast gdy infekcja rozprzestrzeni się poza obszar pierwotnego występowania mówi się o zakażeniu ogólnym. Jego skrajnie niebezpiecznym typem jest **sepsa** (posocznica), do której dochodzi na przykład u pacjentów o znacznie obniżonej odporności. Typowymi objawami – zarówno zakażeń miejscowych, jak i posocznicy – upośledzającymi mechanizmy homeostatyczne są:

- obniżenie temperatury ciała (hipotermia) poniżej 36°C lub podwyższenie tej temperatury (hipertermia) powyżej 38°C,
- podwyższone tętno (powyżej 90 uderzeń na minutę),
- zwiększone tempo oddychania (powyżej 20 oddechów na minutę),
- zwiększona liczba leukocytów (powyżej 12 000 w mm^3 krwi).



24.1. Laseczka jadu kiełbasianego (*Clostridium botulinum*), wytwarzająca silną toksynę



24.2. Rącznik pospolity (*Ricinus communis*) używany do wytwarzania rycyny

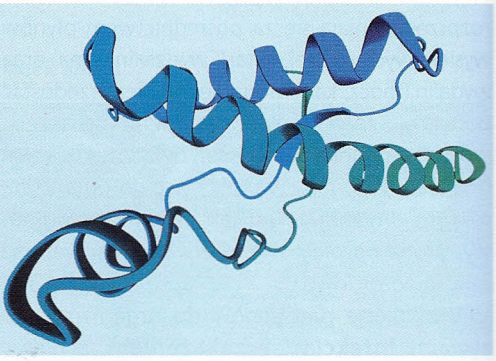
Objawy chorobowe często są efektem wydzielanych przez patogeny związków chemicznych, działających toksycznie na organizm. Przykładem takiego związku może być jedna z najsilniejszych znanych trucizn, czyli toksyna jadu kiełbasianego, którą wytwarzają **laseczki jadu kiełbasianego** (*Clostridium botulinum*) **(24.1.)**. Dawka śmiertelna tej substancji dla człowieka zależy od drogi, jaką przedostanie się ona do organizmu (może wynosić zaledwie 10 ng na kg masy ciała). Bardzo groźna jest również rycyna uzyskiwana z nasion **rącznika pospolitego** (*Ricinus communis*) **(24.2.)**. Jej dawka śmiertelna także zależy od drogi podania (może wynosić ok. 3 μg na kg masy ciała). Toksyną, z powodu której notuje się dużo groźnch zatruć, jest α-amanityna. Występuje ona u **muchomora sromotnikowego** (*Amanita phalloides*) **(24.3.)** i uszkadza wątrobę (dawka śmiertelna to ok. 0,1 mg na kg masy ciała).

Szczególnym rodzajem czynnika zakaźnego są **priony** (opisane po raz pierwszy w 1982 roku) **(24.4.)**. To niewielkie białka wywołujące choroby degeneracyjne mózgu, jak **choroba Creutzfeldta–Jakoba** czy **kuru** (spotykane u ludzi) oraz **scrapie** (występująca u owiec). Białka prionowe PrP-C (ang. *cellular* – „komórkowe") występują w organizmie w warunkach fizjologicznych (są kodowane przez DNA). Z niewyjaśnionych przyczyn u chorych osobników zostają one przekształcone w białko patogenne (nazywane PrP-Sc, z ang. *scrape* – „ocierać się", „drapać"). Według teorii prionowej te patogenne białka mają zdolność do wpływania na zdrowe: wymuszają zmiany ich struktury przestrzennej. W wyniku działania zmienionych białek prionowych na neurony dochodzi do uszkodzeń mózgu. Na skutek pojawiających się ubytków przypomina on gąbkę, stąd inna nazwa chorób prionowych – **gąbczaste encefalopatie**. U osobnika zarażonego pojawiają się objawy otępienia, zaburzeń pamięci, snu oraz łaknienia. Choroba ma zawsze śmiertelny finał, nie jest bowiem znana skuteczna metoda leczenia.

? Jakie są charakterystyczne cechy muchomora sromotnikowego?



24.3. Muchomor sromotnikowy (*Amanita phalloides*), przyczyna jednych z najczęstszych zatruć



24.4. Prion, wywołuje chorobę Creutzfeldta–Jakoba

Stres a zaburzenia homeostazy

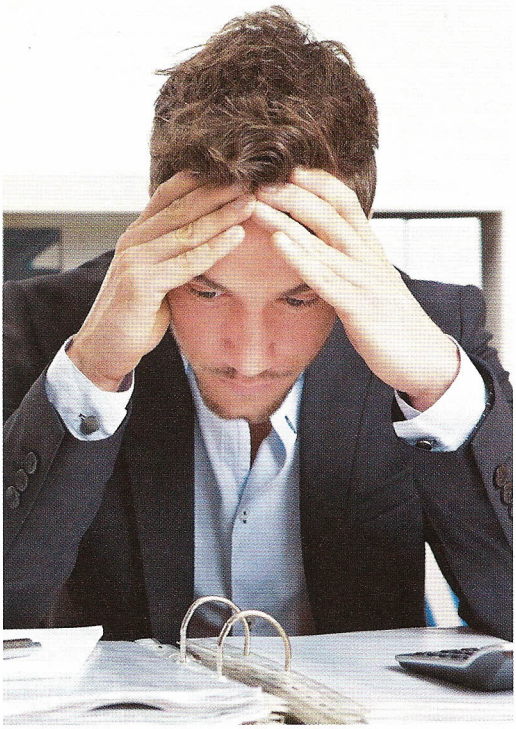
Stres to reakcja organizmu na działanie bodźców nazywanych **stresorami**, zaburzających stan homeostazy **(24.5.)**. Do stresorów zaliczamy zarówno czynniki **biologiczne** (bakterie, wirusy), substancje **chemiczne** (nadmierna ilość CO_2 we krwi, brak tlenu), jak i czynniki **fizyczne** (wysoka lub niska temperatura otoczenia, ciśnienie). Zaburzenie homeostazy może również być skutkiem strachu odczuwanego przez dłuższy czas lub napięcia emocjonalnego – wywołanych czynnikami, których nie da się uniknąć.

Gdy organizm znajdzie się pod wpływem stresora, uruchamia reakcje obronne obejmujące kilka faz. Pierwszą jest **faza alarmowa**, w której osobnik dąży do usunięcia skutków działania stresorów, a w skrajnych wypadkach podejmuje walkę o życie lub próbę ucieczki.

Mobilizacja organizmu rozpoczyna się w podwzgórzu, które pobudza następnie leżącą nieopodal przysadkę mózgową do produkcji adrenokortykotropiny (ACTH). Hormon ten za pośrednictwem układu krwionośnego zostaje przetransportowany do kory nadnerczy. Tam stymuluje produkcję **kortyzolu**, nazywanego potocznie hormonem stresu. Jego podstawowym zadaniem jest aktywizacja rezerw energetycznych organizmu poprzez utrzymywanie wysokiego poziomu glukozy we krwi. Kortyzol nasila bowiem działanie noradrenaliny i adrenaliny, które intensyfikują proces rozpadu glikogenu w wątrobie. Samodzielnie wpływa też na proces glukoneogenezy oraz zmniejsza wykorzystanie glukozy przez mięśnie szkieletowe. Kortyzol przyspiesza również metabolizm tłuszczów (zarówno lipolizę, jak i lipogenezę) oraz białek (głównie proteolizę) oraz prowadzi do spadku sprawności układu immunologicznego. Pośrednio wpływa też na zwiększenie ciśnienia krwi, działając na warstwę rdzeniową nadnerczy, która w odpowiedzi rozpoczyna wydzielanie adrenaliny i noradrenaliny.

Jeśli działanie stresorów się przedłuża, wówczas – dzięki mechanizmom uruchomionym w fazie alarmowej – organizm wchodzi w fazę adaptacji (przystosowania). Pozwala ona normalnie funkcjonować, mimo stałego oddziaływania stresorów. Jeśli natomiast organizm nie jest w stanie zaadaptować się do warunków działania stresorów (np. gdy są one zbyt silne), przechodzi w fazę wyczerpania. Mogą wówczas wystąpić choroby psychosomatyczne, takie jak: nadciśnienie tętnicze, choroba niedokrwienna serca, choroba wrzodowa żołądka i dwunastnicy oraz cukrzyca. W skrajnych przypadkach przedłużający się stres może prowadzić nawet do śmierci.

? Na jakie układy organizmu stres może wpływać niekorzystnie?

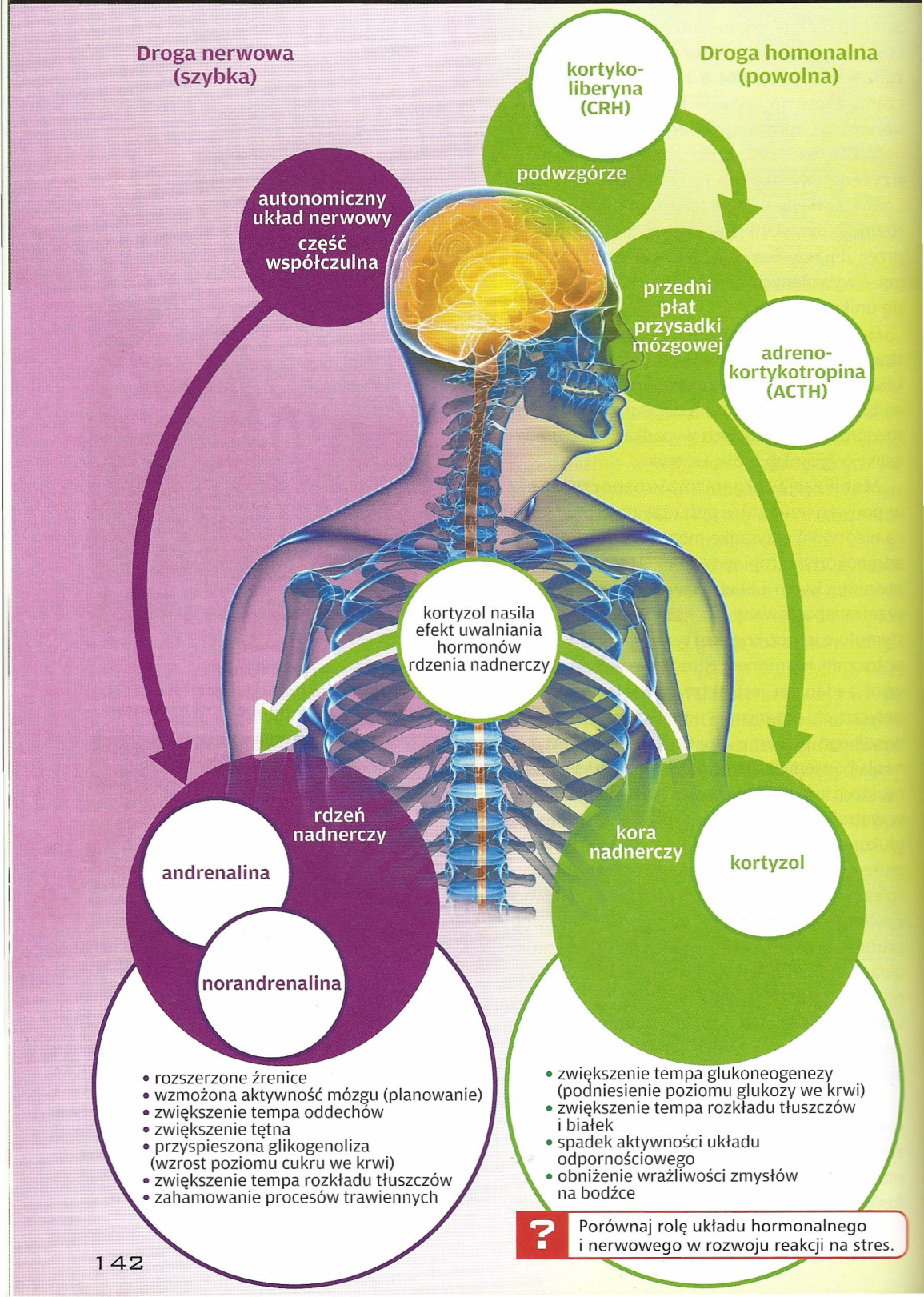


24.5. Stres to nie tylko wynik napięcia psychicznego, lecz także reakcja organizmu na czynniki zaburzające stan wewnętrznej równowagi.

Wpływ długotrwałego stresu na funkcjonowanie organizmu

- stany lękowe i depresyjne
- bóle (głowy, mięśni, kręgosłupa)
- choroba nadciśnieniowa, choroby serca
- zaburzenia ze strony układu pokarmowego (wymioty, biegunka, zaparcia, niestrawność)
- zwiększenie podatności na infekcje
- choroby autoimmunologiczne
- zahamowanie popędu płciowego

SCHEMAT DZIAŁANIA UKŁADU NERWOWEGO I HORMONALNEGO W WARUNKACH STRESU



? Porównaj rolę układu hormonalnego i nerwowego w rozwoju reakcji na stres.

Wpływ nikotyny na zaburzenie procesu homeostazy

Nikotynizm, czyli uzależnienie od nikotyny, mimo wielu przesłanek o jego szkodliwości na ogół nie jest traktowany jako poważne zagrożenie dla zdrowia. W przeciwieństwie do narkotyków palenie papierosów nie powoduje bowiem bezpośrednio negatywnych objawów.

Przeciętny papieros zawiera blisko 4000 różnych związków chemicznych, w tym 19 metali ciężkich (np. ołów, arsen, kadm, rtęć) i ponad 40 substancji rakotwórczych. Spośród nich najbardziej uzależniającym związkiem jest **nikotyna** (typowy papieros zawiera ok. 15 mg nikotyny, z czego do krwioobiegu trafia ok. 0,1 mg).

Na podstawie ilustracji oceń, jak szkodliwe może być dla organizmu palenie papierosów.

Pod względem chemicznym nikotyna jest alkaloidem o drażniącym smaku i cierpkim zapachu. Wytwarzają go między innymi **tytoń szlachetny** (*Nicotiana tabacum*) **(24.6.)** i **tytoń bakun** (*Nicotiana rustica*). Zażywanie nikotyny polega głównie na jej paleniu w postaci papierosów **(24.7.)**, cygar bądź fajek. Tytoń bywa również żuty lub wciągany do jamy nosowej (w postaci tabaki).

Pierwszym objawem działania niewielkich dawek nikotyny jest stan pobudzenia wywołany zwiększonym wydzielaniem adrenaliny. Powoduje ona podniesienie tętna i ciśnienia krwi (poprzez zwężenie światła naczyń obwodowych i wieńcowych). W następstwie tych procesów u osób z miażdżycą tętnic może dojść do rozwoju **choroby niedokrwiennej serca**, a w dalszej kolejności – do **zawału mięśnia sercowego**. Wysokie dawki nikotyny prowadzą też do spowolnienia przesyłania impulsów w ośrodkowym układzie nerwowym.



24.6. Plantacja tytoniu szlachetnego (*Nicotiana tabacum*)

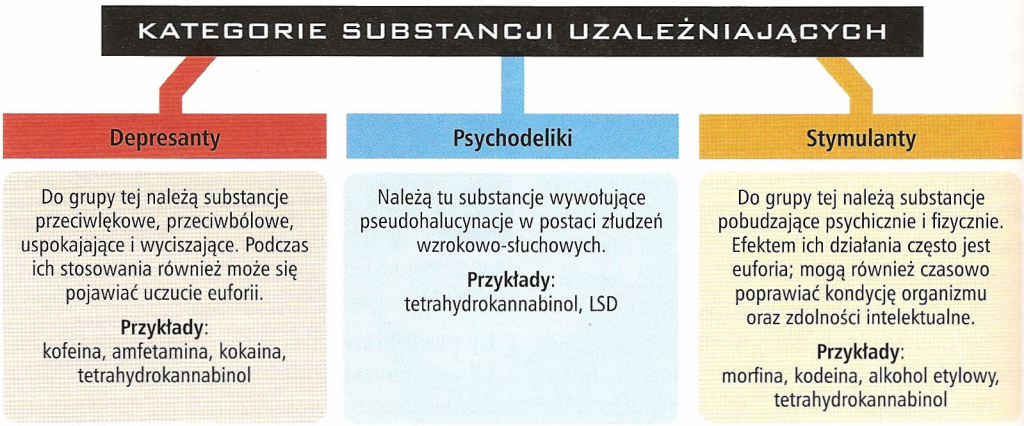
Nikotynizm powoduje również inne, groźne w skutkach zaburzenia fizjologiczne. Jednymi z najpoważniejszych są kumulowane przez lata uszkodzenia komórek, mogące prowadzić do rozwoju choroby nowotworowej (płuc, ust, gardła lub trzustki). Z kolei **przewlekła obturacyjna choroba płuc** (**POChP**) wynika z trwałego uszkodzenia struktury miąższu płucnego i pęcherzyków płucnych, co powoduje ciężkie i nawracające stany zapalne oskrzeli oraz rozedmę płuc. Podobnie jak w przypadku choroby nowotworowej, późne wykrycie POChP wiąże się z zagrożeniem życia pacjenta.



24.7. Uproszczony skład chemiczny papierosa

? Na podstawie rysunku oceń, jak szkodliwy dla organizmu może być nałóg palenia.

Zaburzenia homeostazy spowodowane stosowaniem używek i narkotyków



UWAGA! Powyższy podział ma wyłącznie charakter poglądowy, gdyż duża część znanych substancji narkotycznych wykazuje działanie łączone.

Kofeina

Związek pochodzenia roślinnego, obecny w nasionach **kawowca** i **guarany** oraz w liściach herbaty. Działa na organizm w złożony sposób. Łatwo przenika przez barierę krew – mózg, dlatego silnie wpływa na liczne ośrodki mózgu: usuwa objawy zmęczenia, poprawia koncentrację i nastrój. Wywołuje jednak również szereg efektów niepożądanych.

Amfetamina

Należy do syntetycznych związków organicznych o silnym działaniu psychotropowym. Odpowiada za desynchronizację półkul mózgowych widoczną głównie w obrazie EEG (EEG – elektroencefalogram). Powoduje też uszkodzenia mięśnia sercowego.

Kokaina

Silnie uzależniająca substancja organiczna, otrzymywana z liści koki, czyli **krasnodrzewu pospolitego** (*Erythroxylon coca*).

Opium i jego składniki

Opium powstaje przez wysuszenie soku z niedojrzałych makówek **maku lekarskiego** (*Papaver somniferum*). Było stosowane już około 5 tysięcy lat temu przez Sumeryjczyków (później

Działanie używek	
Używka	**Zaburzenia homeostazy spowodowane zażywaniem**
kofeina	• negatywny wpływ na pamięć długotrwałą • spowolnienie perystaltyki jelit i żołądka • zwężenie źrenic • niepokój, rozdrażnienie • tachykardia i arytmia serca
amfetamina	• przyspieszenie akcji serca i ciśnienia krwi • przyspieszenie tempa oddechów • podwyższenie progu wrażliwości na ból (działanie przeciwbólowe) • rozszerzenie źrenic
kokaina	• wzrost ciśnienia tętniczego w wyniku skurczu mięśni gładkich naczyń krwionośnych • zaburzenia rytmu serca • spowolnienie perystaltyki jelit • zahamowanie wydzielania śliny • rozszerzenie źrenic
opium	a) wywoływane przez morfinę: • euforia • zwężenie źrenic • spowolnienie perystaltyki żołądka i jelit • spowolnienie liczby oddechów w wyniku hamującego działania na ośrodek oddechowy b) wywoływane przez kodeinę: • euforia, senność, apatia • spowolnienie perystaltyki żołądka i jelit • zanik uczucia głodu
GHB	• zaburzona koordynacja ruchowa i zawroty głowy • utrata przytomności (dawka GHB powyżej 4 mg) • amnezja
marihuana	• zaburzenia pamięci i koncentracji uwagi oraz percepcji czasu • zaburzenia snu

przez Egipcjan oraz Greków); głównie jako środek uspokajający, nasenny i przeciwbólowy. Opium jest mieszaniną około 40 alkaloidów (nazywanych **opiatami**). Do najważniejszych należą **morfina** (stosowana jako środek przeciwbólowy) i **kodeina** (wykorzystywana jako środek przeciwkaszlowy i przeciwbólowy).

GHB

Skrót ten oznacza kwas 4-hydroksybutanowy, stosowany jako depresant wywołujący stany euforyczne (w dawce nieprzekraczającej 2,5 mg). W dawce reakcyjnej (przekraczającej 4 mg) wykorzystywany jako tak zwana **pigułka gwałtu**, powodująca utratę świadomości połączoną z amnezją.

Marihuana

Środek odurzający uzyskiwany z wysuszonych (czasem sfermentowanych) żeńskich kwiatostanów **konopi indyjskich** (*Cannabis indica*). Najważniejszą substancją psychoaktywną zawartą w marihuanie jest **delta-9-tetrahydrocannabinol** (**THC**). Do najczęstszych objawów zażywania THC należą: euforia, uspokojenie, zmniejszenie wrażliwości na ból.

Wpływ leków na homeostazę organizmu

Lekomania (**farmakomania**) to nałóg polegający na nadużywaniu leków w celu osiągnięcia za ich pomocą efektu nieadekwatnego do potrzeby. Uzależnienie od leków ma charakter psychiczny i fizyczny, a w przypadku zaprzestania ich zażywania widoczne są typowe, ciężkie objawy abstynencji. Zarówno w czasie przyjmowania, jak i w momencie odstawienia leków mogą się pojawiać niepożądane objawy ze strony różnych narządów (zaburzenia ciśnienia krwi i pracy serca, zaburzenia oddychania, układu pokarmowego, jak również biegunka, wymioty oraz bóle mięśni).

PODSUMOWANIE



- Zdrowie to według WHO brak choroby lub kalectwa oraz stan pełnego fizycznego, umysłowego i społecznego dobrostanu (dobrego samopoczucia).
- Wyróżnia się biologiczne, fizyczne, chemiczne oraz społeczne czynniki mogące zaburzać homeostazę organizmu.
- Każdy czynnik wytrącający organizm ze stanu równowagi nazywamy stresorem, a stan zaburzenia równowagi – stresem.
- Jedną z najpowszechniej stosowanych używek wpływających na funkcjonowanie organizmu jest nikotyna.
- Szczególny problem, zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych, stanowi uzależnienie od leków, czyli lekomania.

ZADANIA



1. Sklasyfikuj drogi, którymi czynniki patogenne mogą przedostawać się do organizmu.
2. Scharakteryzuj kolejne fazy mobilizacji organizmu funkcjonującego pod wpływem stresu.
3. Opracuj plakat zachęcający do rzucenia palenia. Zwróć w nim uwagę na zaburzenia funkcji organizmu wywoływane przez nikotynę.
4. Omów różnice między zdrowym, fizjologicznym białkiem prionowym a jego patogennym odpowiednikiem.

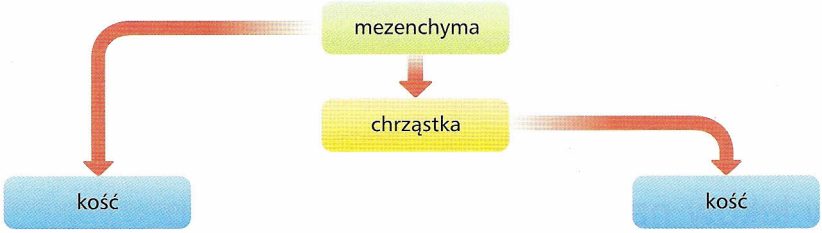
W INTERNECIE



- http://stres-info.com.pl/
- http://rzucpalenie.edu.pl/2010/12/17/nikotynizm-czym-jest/

25. Budowa szkieletu człowieka

Szkielet (gr. *skeleton*) jest jedną z podstawowych struktur występujących w organizmach kręgowców. Stanowi rusztowanie ciała i nadaje mu kształt, a także umożliwia zmianę jego położenia, czego konsekwencją jest ruch. Pozwalają na to ruchome połączenia między elementami szkieletu, czyli stawy. To one wraz z więzadłami (innym typem połączeń), a także kośćmi i chrząstkami budują układ szkieletowy.

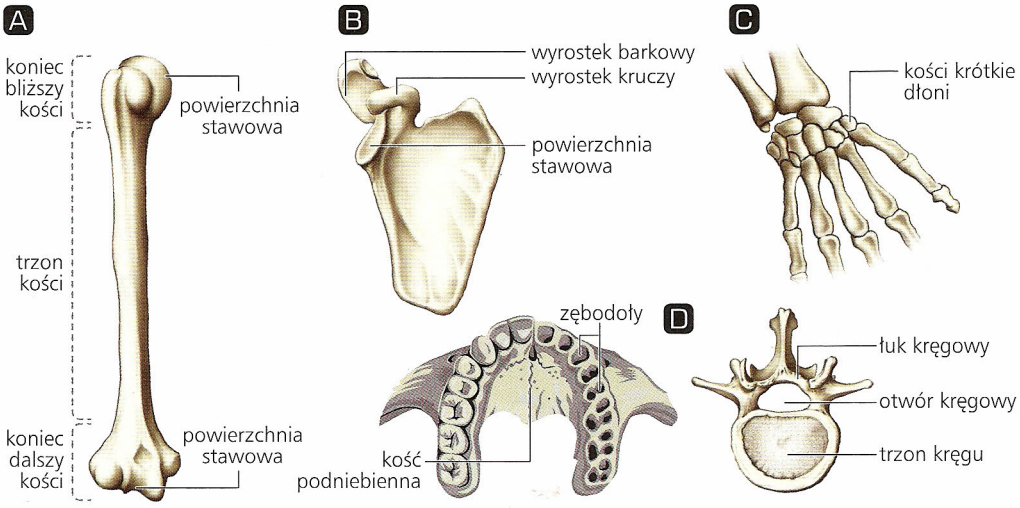


Rodzaje kości

Kości rozwijają się na podłożu **tkanki mezenchymatycznej** (tkanki łącznej zarodkowej) lub też wtórnie – w wyniku kostnienia chrząstki.

Ciało dorosłego człowieka buduje około 206 kości, z których każda jest wyspecjalizowanym narządem, przystosowanym do pełnienia określonej funkcji. Ze względu na budowę dzieli się kości na następujące typy:

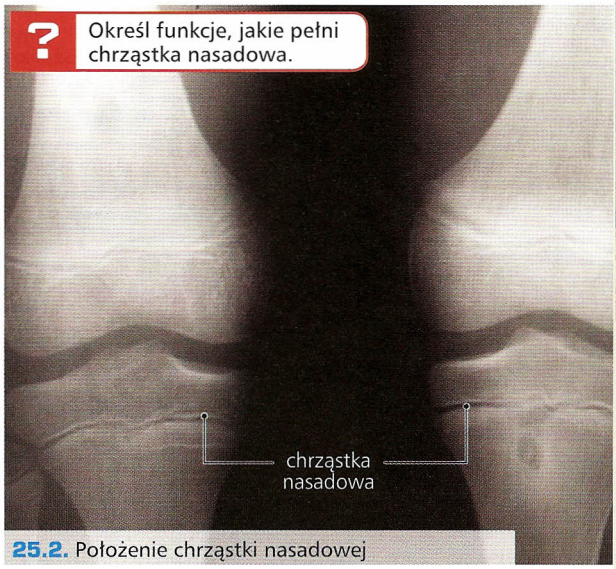
- **kości długie**, których długość znacznie przekracza grubość i szerokość (zalicza się do nich: kość ramienną, udową, piszczelową, strzałkową, promieniową, łokciową oraz żebra, kości śródręcza i śródstopia);
- **kości krótkie**, których długość, grubość oraz szerokość są zbliżone (należą do nich: kości nadgarstka, stępu oraz tzw. trzeszczki, jak np. rzepka);
- **kości płaskie**, których szerokość i długość znacznie przewyższają grubość (należą do nich: kości sklepienia czaszki, kości biodrowe, mostek oraz łopatka);
- **kości różnokształtne**, mające nieregularny kształt (należą do nich: kręgi, kość klinowa, kość podniebienna, a także kostki słuchowe, czyli młoteczek, kowadełko i strzemiączko) **(25.1.)**.



25.1. Budowa zewnętrzna kości: A) długich (kość ramienna), B) płaskich (łopatka), C) krótkich (kość nadgarstka) oraz D) różnokształtnych (kość podniebienna, kręg lędźwiowy)

Budowa zewnętrzna kości

W budowie typowej kości długiej wyróżnia się **trzon kości** oraz znajdujące się na jego skrajach **końce kości** (bliższy – umiejscowiony bliżej tułowia oraz dalszy – położony dalej). U osobników młodych, u których proces kostnienia jeszcze się nie zakończył, końce kości nazywane są **nasadami kości**. Na granicy między trzonem kości a nasadami znajduje się **chrząstka nasadowa** (25.2.). Wraz z wiekiem w chrzęstnych obszarach kości rozpoczyna się proces kostnienia. Ośrodki kostnienia pojawiające się w trzonie i nasadach kości stopniowo się rozszerzają. W tym samym czasie komórki chrząstki nasadowej przechodzą liczne podziały, dzięki czemu powodują przyrost kości na długość. Po osiągnięciu dojrzałości płciowej proces ten ulega zahamowaniu pod wpływem hormonów, chrząstka nasadowa kostnieje, co skutkuje zakończeniem wzrostu kości.



25.2. Położenie chrząstki nasadowej

:: Ciekawostka

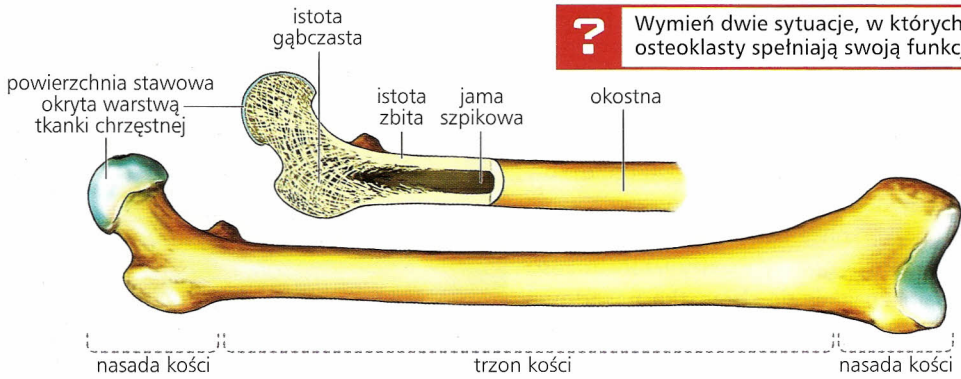
W różnych miejscach szkieletu proces kostnienia zachodzi w różnym tempie. Liczba kości u noworodka wynosi około 270. Wraz z pojawianiem się tak zwanych wtórnych punktów kostnienia liczba kości wzrasta (u czternastolatka jest ich już 356). Nie oznacza to większej liczby odrębnych kości, gdyż wiele z nich pozostaje ze sobą funkcjonalnie powiązanych (np. w kości udowej jest aż pięć punktów kostnienia: jeden pierwotny w trzonie kości, dwa wtórne w nasadach i dwa tworzące miejsca przyczepu mięśni). W wieku około 25 lat (m.in. w wyniku zrastania się nasad kości z trzonem) liczba kości spada i wynosi ostatecznie około 206.

Struktura i skład chemiczny kości

Zewnętrzna część trzonu kości zbudowana jest z **istoty zbitej**, natomiast w nasadach kości występuje **istota gąbczasta** (25.3.).

W porównaniu do istoty zbitej istota gąbczasta kości ma budowę przypominającą gąbkę. Beleczki kostne są stosunkowo luźno ułożone, tworzą wolne przestrzenie zwane **jamkami szpikowymi**. Wypełniają je komórki szpiku (25.4.). U dorosłych jamy szpikowe dużych kości wypełnia przede wszystkim **szpik kostny żółty**. Składa się on głównie z komórek tłuszczowych. Jamki szpikowe istoty gąbczastej kości płaskich (czaszki, mostka, obojczyka, miednicy oraz żeber) wypełnia szpik budowany w dużej mierze przez komórki układu krwiotwórczego. Jest on nazywany **szpikiem kostnym czerwonym** i stanowi właściwy narząd krwiotwórczy. Oznacza to, że produkuje wszystkie elementy morfotyczne krwi, czyli erytrocyty, leukocyty oraz płytki krwi. Szpik żółty w razie nagłej potrzeby (np. utraty dużej ilości krwi na skutek krwotoku) może przekształcić się w szpik czerwony, stanowi więc rezerwę sytemu krwiotwórczego.

Kości (za wyjątkiem powierzchni stawowych) pokryte są **okostną**, która ma postać cienkiej błonki zbudowanej z tkanki łącznej zbitej. Zawiera ona liczne naczynia krwionośne (pełniące funkcje odżywcze) oraz nerwy. Okostna ma kluczowe znaczenie dla funkcjonowania kości. Jeśli na skutek uszkodzenia lub choroby dojdzie do jej zaniku, następuje nieodwracalny proces obumierania i rozpadu tkanki kostnej. W najgłębszej warstwie okostnej, przylegającej bezpośrednio do kości, zlokalizowane są liczne komórki kościotwórcze



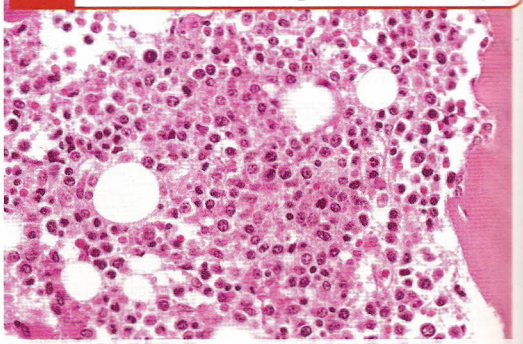
? Wymień dwie sytuacje, w których osteoklasty spełniają swoją funkcję.

25.3. Przekrój podłużny i poprzeczny kości długiej

(**osteoblasty**) oraz komórki kościogubne (**osteoklasty**). Osteoblasty powodują wzrost kości oraz gojenie złamań. Osteoklasty namnażają się zwykle w przypadku złamania, pęknięcia lub innego urazu kości. Migrują wówczas do miejsca uszkodzenia. Tam rozpuszczają tkankę kostną, dzięki czemu umożliwiają precyzyjne jej zrośnięcie.

Kości składają się zarówno ze związków nieorganicznych, jak i organicznych. Te pierwsze stanowią około 66% masy kości, a najważniejszym z nich jest **fosforan wapnia**. Na część organiczną kości składają się włókna kolagenowe i inne substancje białkowe. Każdy ze składników kości odpowiada za inne ich cechy: związki nieorganiczne zapewniają im twardość i wytrzymałość, podczas gdy związki organiczne – elastyczność.

? Dlaczego przy transplantacji szpiku kluczowe znaczenie ma ocena zgodności tkankowej?



25.4. Szpik kostny człowieka (zdjęcie wykonane mikroskopem świetlnym)

Połączenia kości

Szkielet odgrywa rolę struktury ochronnej oraz podpory dla mięśni, które są czynnymi elementami aparatu ruchu. Pełnienie tych funkcji umożliwiają mu dwa rodzaje połączeń występujących pomiędzy kośćmi: połączenia ścisłe (ciągłe) oraz połączenia ruchome (nieciągłe).

Połączenia ścisłe powstają, gdy dwie sąsiadujące ze sobą kości zostają trwale zespolone za pośrednictwem tkanki łącznej. W zależności od jej charakteru można wyróżnić:

- **więzozrosty** – połączenia kości w postaci pasm tkanki łącznej (występują pomiędzy kośćmi przedramienia, w łukach kręgowych, w aparacie więzadłowym krtani, a także odpowiadają za mocowanie zęba w zębodole; więzozrosty łączące kości sklepienia czaszki noszą nazwę szwów);
- **chrząstkozrosty** – zespolenie sąsiednich kości za pomocą tkanki chrzęstnej szklistej (występuje pomiędzy pierwszym, szóstym i siódmym żebrem a mostkiem);
- **kościozrosty** – najmocniejszy typ połączenia kości; powstają późno, w wyniku kostnienia innych typów połączeń (występują pomiędzy tworzącymi miednicę kośćmi biodrową, łonową oraz kulszową).

Połączenia ciągłe cechuje niewielki zakres ruchów sąsiadujących kości. Znacznie większą ruchomość wykazują **połączenia nieciągłe** (wolne), czyli **stawy**.

Powierzchnia stawowa pokryta jest chrząstką stawową szklistą i może mieć płaski, wypukły lub wklęsły kształt. Wypukłe powierzchnie stawowe tworzą **główki stawowe**, a powierzchnie wklęsłe – **panewki stawowe** (25.5.). Chrząstki tworzące powierzchnie stawowe są niemal idealnie gładkie, co zmniejsza do minimum tarcie wytwarzane w czasie ruchu. Dzięki temu, mimo intensywnej eksploatacji, chrząstka stawowa ulega zużyciu w niewielkim stopniu. Ponieważ tkanka chrzęstna

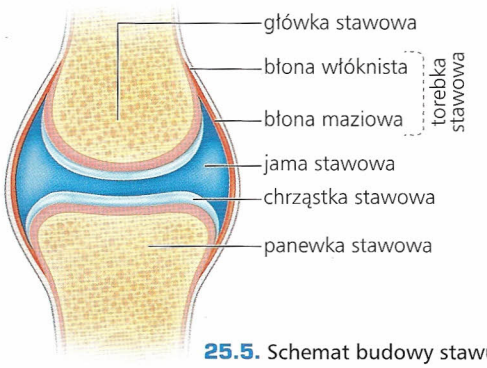
nie jest ani ukrwiona, ani unerwiona, wszystkie niezbędne do życia substancje komórki chrząstki pobierają z sąsiednich tkanek na drodze dyfuzji.

Torebka stawowa wyznacza granice stawu i oddziela jego ruchome elementy od otoczenia. Wewnętrzna część torebki stawowej (zwana **błoną maziową**) wydziela do jej wnętrza **maź stawową**, zmniejszającą tarcie pomiędzy kośćmi tworzącymi staw.

Ze względu na wykonywany zakres ruchów oraz kształt powierzchni stawowych wyróżnia się następujące typy stawów:

- **kuliste** – główka stawu ma kształt wycinka kuli, a wklęsła panewka stawu jest do niej dopasowana; ruchomość tego typu stawu jest niemal całkowita we wszystkich płaszczyznach (przykładem jest staw ramienny);
- **siodełkowe** – obie powierzchnie stawowe mają kształt siodła, czyli są wypukłe względem jednej osi symetrii a wklęsłe względem drugiej; ruch odbywa się w dwóch płaszczyznach prostopadłych do siebie (przykładem jest staw nadgarstkowo-śródręczny kciuka);
- **zawiasowe** – jednoosiowe stawy, które umożliwiają wykonywanie ruchów w jednej płaszczyźnie, czyli zginanie i prostowanie (występują między paliczkami oraz kością ramienną i łokciową);

? Jaką rolę odgrywa w stawie maź stawowa?

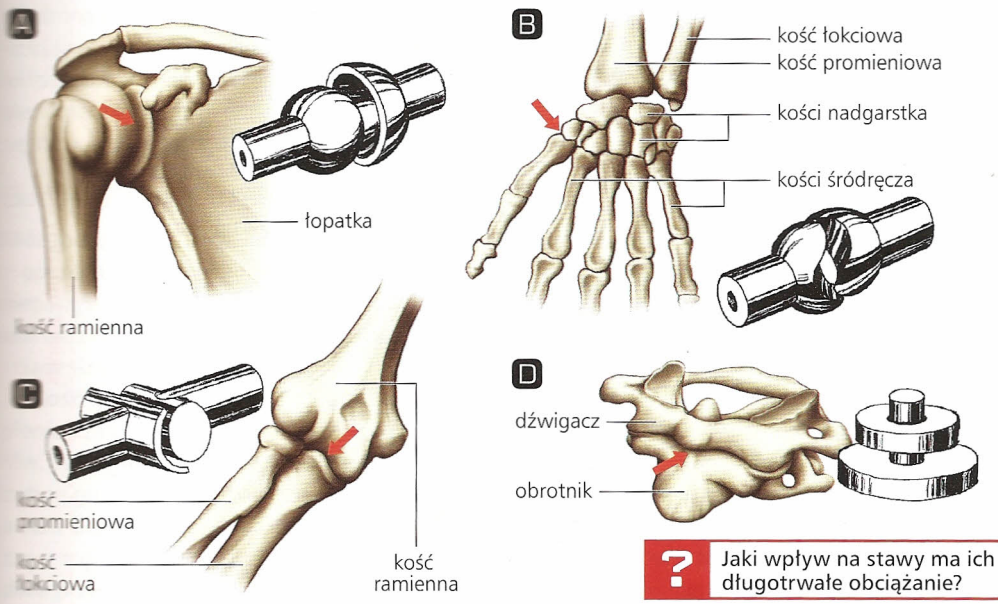


25.5. Schemat budowy stawu

:: Ciekawostka

W razie długotrwałego ograniczenia ruchomości stawu (np. po złamaniu) może dojść do jego trwałego usztywnienia. W obrębie powierzchni stawowych zaczyna się rozwijać tkanka łączna zajmująca ostatecznie jamę stawową i trwale łącząca sąsiadujące kości.

- **obrotowe** – jednoosiowe stawy z główką o kształcie cylindrycznym; wykonują ruchy obrotowe (jak np. staw promieniowo-łokciowy oraz staw między pierwszym i drugim kręgiem szyjnym) **(25.6.)**.



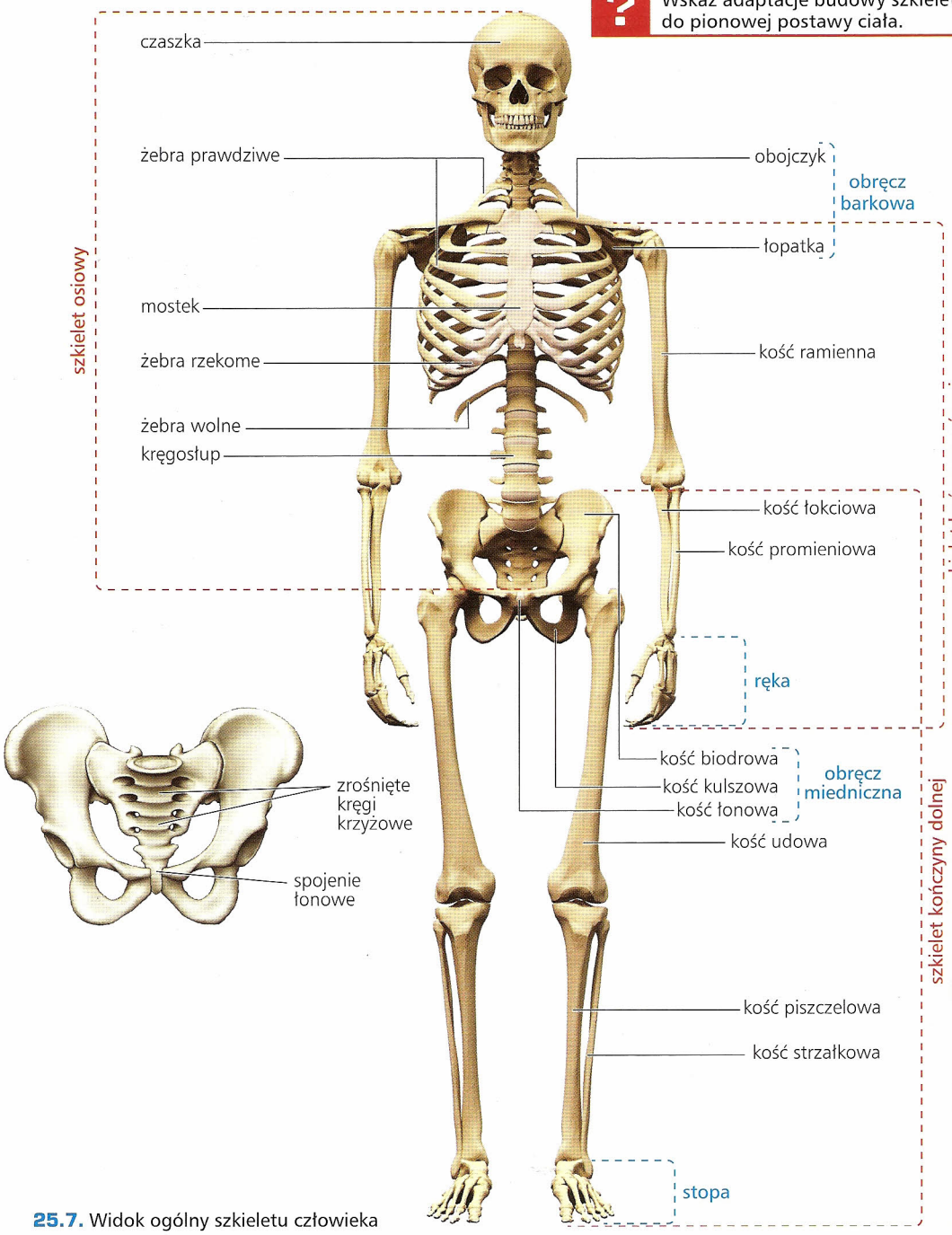
? Jaki wpływ na stawy ma ich długotrwałe obciążanie?

25.6. Rodzaje stawów: A) kulisty (staw ramienny), B) siodełkowy (nadgarstkowo-śródręczny kciuka), C) zawiasowy (staw łokciowy), D) obrotowy (między pierwszym i drugim kręgiem szyjnym)

Szczegółowa budowa szkieletu człowieka

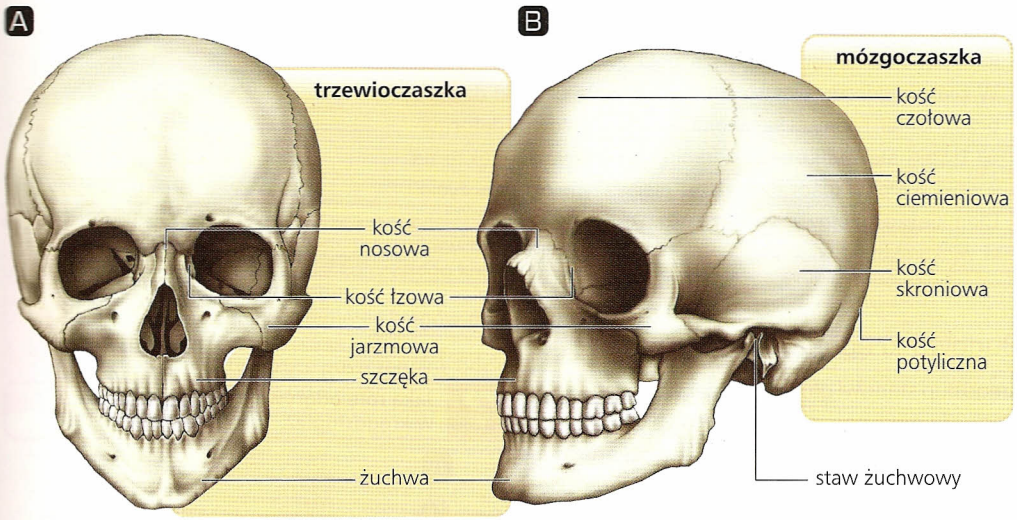
Pod względem funkcjonalnym szkielet człowieka można podzielić na: **szkielet osiowy** (złożony z czaszki, kręgosłupa, żeber i mostka) oraz **szkielet kończyn** (25.7.).

? Wskaż adaptacje budowy szkieletu do pionowej postawy ciała.



25.7. Widok ogólny szkieletu człowieka

? Oceń, jakie znaczenie ma fakt, że mózgoczaszka zbudowana jest z licznych kości połączonych za pomocą szwów.



25.8. Struktura czaszki człowieka widzianej od przodu (A) oraz w rzucie ukośnym (B)

Budowa czaszki

Czaszka jest zbudowaną z 23 kości puszką kostną, otaczającą mózg, narządy zmysłów, jamę nosową i jamę ustną **(25.8.)**. Składa się z części górno-tylnej (zwanej **mózgoczaszką**) oraz części przednio-dolnej (nazywanej **trzewioczaszką**). U człowieka osadzona jest na szczycie kręgosłupa. Tworzące ją kości są nieruchomo połączone za pomocą szwów (więzozrostów), które z czasem kostnieją. Jedynym elementem ruchomym czaszki jest żuchwa, łącząca się stawowo z kością skroniową.

Budowa mózgoczaszki

Mózgoczaszka człowieka ochrania mózgowie z oponami mózgowymi. Tworzą ją cztery kości nieparzyste (czołowa, potyliczna, klinowa, sitowa) oraz cztery kości parzyste (dwie ciemieniowe i dwie skroniowe).

Kość czołowa buduje przednią część sklepienia czaszki, w tym górną krawędź oczodołów. Na powierzchni tej kości znajdują się tak zwane guzy czołowe (większe u dzieci i kobiet), a nad oczodołami – łuki brwiowe (wyraźniejsze u mężczyzn). W kości czołowej mieszczą się dwie przestrzenie wypełnione powietrzem, zwane zatokami czołowymi. Z kolei tył i dół czaszki buduje **kość potyliczna**. W jej środkowej części położony jest tak zwany otwór wielki, łączący jamę czaszki z kanałem kręgowym kręgosłupa. Na kości potylicznej znajdują się też dwa kłykcie potyliczne, łączące stawowo czaszkę z pierwszym kręgiem kręgosłupa (atlasem).

Parzyste **kości ciemieniowe** tworzą górną część (sklepienie) czaszki i – wraz z **kośćmi skroniowymi** – jej ściany boczne. Poza tym w każdej z kości skroniowych znajdują się narządy słuchu i równowagi.

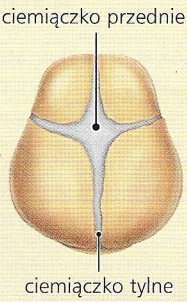
Budowa trzewioczaszki

Trzewioczaszka również jest zbudowana z kości nieparzystych i parzystych. Do pierwszych zalicza się **żuchwę**, będącą największą częścią twarzoczaszki, a równocześnie jedyną ruchomą częścią całej czaszki. Trzon żuchwy ma kształt podkówki i, podobnie jak kości szczękowe, jest miejscem osadzenia zębów w zębodołach. Za pomocą stawów skroniowo-żuchwowych żuchwa łączy się z kośćmi skroniowymi.

Oprócz wspomnianych już kości szczękowych do kości parzystych należą również kości podniebienne, nosowe i łzowe. Te ostanie są jednym z elementów budujących oczodół, podobnie jak kości jarzmowe znajdujące się w bocznej części twarzy i w znacznej mierze decydujące o jej kształcie.

:: Ciekawostka

U noworodka kości czaszki są połączone za pomocą pasm błoniastej tkanki łącznej. W miejscach zespolenia trzech lub więcej kości pojawiają się pola zwane ciemiączkami. W trakcie porodu ułatwiają one przejście czaszki dziecka przez kanał rodny. Ulega ona wtedy czasowej deformacji (staje się wydłużona). Ciemiączka pozwalają także na szybki wzrost kości czaszki w pierwszym okresie życia. Ciemiączko czołowe zarasta tkanką chrzęstną dopiero w wieku około dwóch lat.



Budowa kręgosłupa

Kręgosłup stanowi główny element szkieletu osiowego. Zajmuje położenie grzbietowe w przyśrodkowej części ciała człowieka. Występują w nim charakterystyczne wygięcia, z których dwa skierowane ku przodowi określa się jako **lordozy** (szyjną i lędźwiową), a dwa skierowane ku tyłowi – jako **kifozy** (piersiową i krzyżową) (25.9.). Te naturalne krzywizny kręgosłupa są konsekwencją pionizacji postawy ciała. Dzięki nim kręgosłup człowieka ma blisko siedemnastokrotnie większą wytrzymałość, niż gdyby był całkowicie prosty. Wygięcia umożliwiają poza tym amortyzację sił działających w trakcie ruchu.

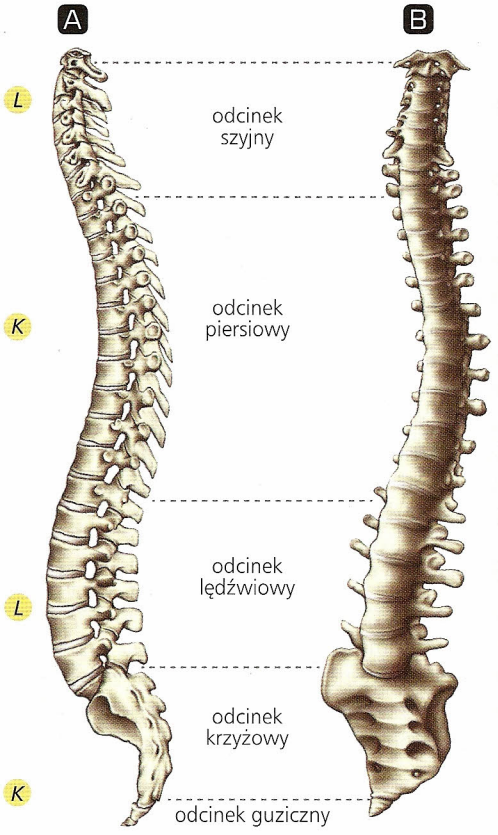
Kręgosłup składa się z 32 do 34 kręgów zgrupowanych w 5 odcinków:

- odcinek szyjny (złożony z 7 kręgów)
- odcinek piersiowy (złożony z 12 kręgów)
- odcinek lędźwiowy (złożony z 5 kręgów)
- odcinek krzyżowy (złożony z 5 kręgów)
- odcinek ogonowy (zwany guzicznym, zbudowany z 3 do 5 kręgów).

Budowa kręgu

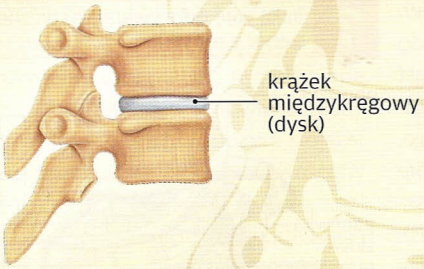
Pierwszym elementem tworzącym typowy kręg jest **trzon kręgu** – złożony z istoty gąbczastej otoczonej przez istotę zbitą i skierowany ku przodowi ciała. Drugi element to **łuk kręgu** zbudowany z istoty zbitej. Odchodzą od niego: wyrostek kolczysty (w linii środkowej), dwa wyrostki poprzeczne i cztery wyrostki stawowe. Trzon i łuk kręgu otaczają **otwór kręgowy**. Otwory kręgowe wszystkich kręgów kręgosłupa tworzą **kanał kręgowy**, w którym przebiega **rdzeń kręgowy**. Trzony sąsiadujących kręgów oddzielają chrzęstne **krążki międzykręgowe**, odpowiedzialne za amortyzację kręgosłupa i niewielką ruchomość kręgów (przy ruchach obrotowych i bocznych kręgosłupa).

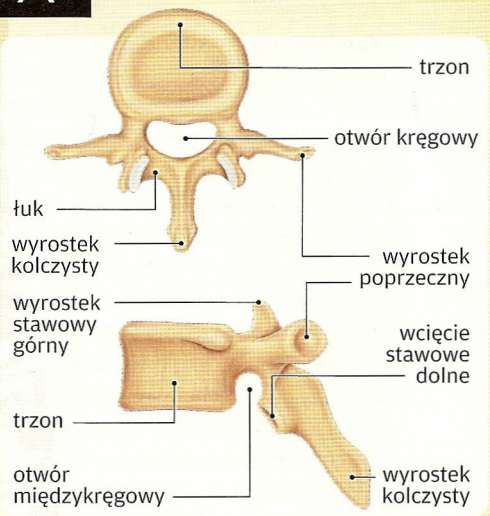
? Jaką rolę odgrywają lordozy i kifozy w kręgosłupie?



25.9. Budowa kręgosłupa dorosłego człowieka: A) widok z boku, B) widok w rzucie ukośnym; widoczne wygięcia – kifozy (K) oraz lordozy (L)

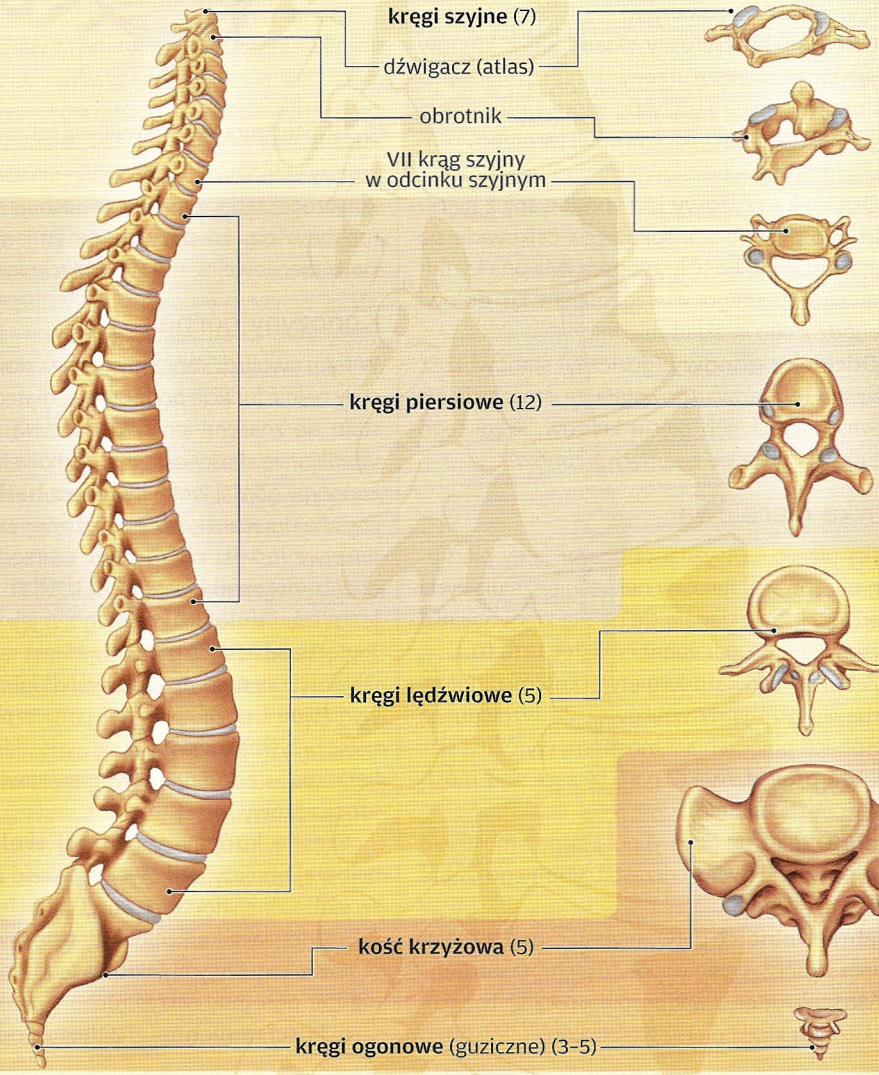
BUDOWA KRĘGOSŁUPA





?

W jaki sposób dwa pierwsze kręgi odcinka szyjnego są przystosowane do pełnionych funkcji?
Porównaj kształt wyrostka kolczystego kręgu lędźwiowego i piersiowego.
Jakie znaczenie ma zrastanie się kręgów odcinka krzyżowego?
Dlaczego kręgi tworzące poszczególne odcinki kręgosłupa różnią się od siebie?



Odcinek szyjny składa się z siedmiu kręgów. Typową budową cechują się kręgi od trzeciego do szóstego, których trzony są niewielkie. Natomiast w pierwszym kręgu tego odcinka, zwanym **dźwigaczem** (lub atlasem), trzon w ogóle nie występuje. Obecne są za to dwie powierzchnie stawowe, które stanowią panewki dwóch kłykci potylicznych czaszki. Drugi kręg szyjny to tak zwany **obrotnik** (axis). Ma niewielki trzon, przekształcony w wyrostek, który wchodzi w otwór kręgowy atlasa. Umożliwia to wykonywanie obrotów głową. Ostatni, siódmy kręg odcinka szyjnego cechuje szczególnie duży (wyczuwalny przez skórę) wyrostek kolczysty.

Odcinek piersiowy tworzy 12 kręgów, z których każdy kolejny ma coraz większy trzon. Boczne części trzonów tworzą powierzchnie stawowe z głowami kości żebrowych.

Odcinek lędźwiowy składa się z kręgów mających największe trzony. Inną ich cechą są poziome wyrostki kolczyste, które umożliwiają wyginanie tego odcinka ku tyłowi (w przeciwieństwie do odcinka piersiowego).

Odcinek krzyżowy jest zbudowany z pięciu kości, które około 25. roku życia całkowicie się zrastają w jedną **kość krzyżową**. Ma ona kształt klina skierowanego wierzchołkiem ku dołowi i wchodzącego w skład miednicy.

Odcinek ogonowy (guziczny) stanowi kość guziczna (ogonowa) powstała ze zrośnięcia się trzech, czterech lub pięciu kręgów. Kręgi tego odcinka składają się z samych trzonów.

Klatka piersiowa

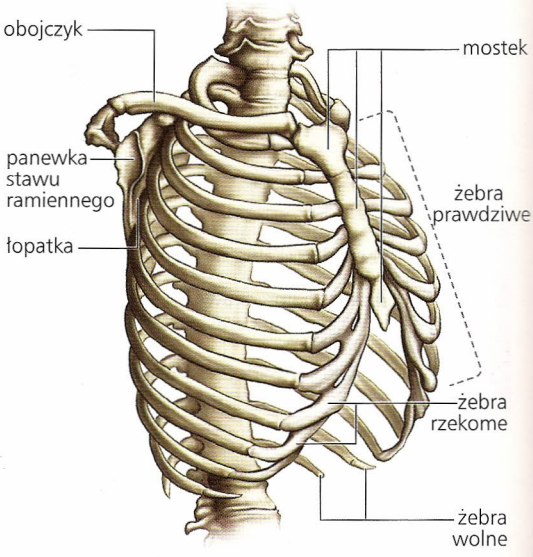
Klatka piersiowa wyznacza obszar jamy piersiowej, mieszczącej narządy najważniejsze dla życia – serce i płuca. Składają się na nią kręgi odcinka piersiowego, 12 par żeber i mostek **(25.10.)**.

Żebra są łukowato wygiętymi kośćmi długimi, pozbawionymi jamy szpikowej. Ze względu na sposób ich połączenia z mostkiem wyróżnia się:

- **żebra prawdziwe** (7 par), łączące się z mostkiem bezpośrednio;
- **żebra rzekome** (3 pary) połączone z mostkiem za pośrednictwem chrząstki siódmego żebra prawdziwego;
- **żebra wolne** (2 pary), niepołączone z mostkiem i kończące się w powłokach brzusznych.

Mostek odgrywa kluczową rolę w tworzeniu kształtu klatki piersiowej. U kobiet jest nieco krótszy i szerszy, a u mężczyzn – dłuższy i węższy. Połączenie żeber z mostkiem cechuje się znaczną ruchomością, co pozwala na zmiany objętości klatki piersiowej w trakcie oddychnia.

? Jaką rolę odgrywają elastyczne połączenia żeber z mostkiem?



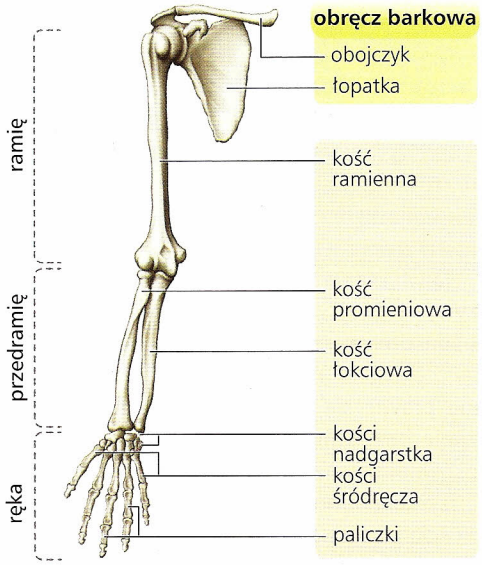
25.10. Struktura klatki piersiowej człowieka

Kończyny górne

W toku ewolucji kończyny górne człowieka przestały pełnić funkcje podporowe, dlatego możliwe stało się znaczne ich skrócenie. Na ich szkielet składają się: kości obręczy barkowej oraz kości kończyny górnej wolnej. **Obręcz barkową** tworzą znajdujące się po grzbietowej stronie ciała parzyste łopatki oraz leżące z przodu parzyste obojczyki. Łopatka jest płaską kością o trójkątnym kształcie. W pobliżu jednego z jej kątów leży zagłębienie będące panewką stawu ramiennego. Obojczyki są natomiast kośćmi długimi, esowato wygiętymi i pozbawionymi jamy szpikowej. Ich część przyśrodkowa łączy się z mostkiem, a część barkowa – z łopatką, tworząc staw barkowo-obojczykowy.

Częścią **kończyny górniej wolnej** leżącą najbliżej obręczy barkowej jest **kość ramienna**. To jedna z największych kości człowieka. Jej głowa stanowiąca koniec bliższy łączy się z łopatką w stawie ramiennym. Budowa tego stawu zapewnia mu ogromny zakres ruchów. Na końcu dalszym **kości ramiennej** znajduje się powierzchnia

stawowa łącząca się z dwiema kośćmi przedramienia (promieniową i łokciową) (25.11.). Biegną one równolegle do siebie i są połączone więzozrostem włóknistym, co umożliwia ruchy obrotowe przedramienia. Gdy w pozycji stojącej ręka zwisa swobodnie, a grzbiet dłoni zwrócony jest ku przodowi i kciuki położone są bliżej korpusu, wtedy kości łokciowa i promieniowa się krzyżują. Jest to tak zwana pozycja nawrócona. Gdy odwróci się dłonie wewnętrzną powierzchnią ku przodowi, wykonując tak zwane odwracanie, **kości przedramienia** zajmują położenie równoległe. Kość łokciowa w części dalszej łączy się z kością promieniową niewielkim stawem. Kość promieniowa umożliwia również połączenie przedramienia z **nadgarstkiem**, który składa się z ośmiu niewielkich kości ułożonych w dwóch rzędach. Cztery z nich tworzą połączenie z kością promieniową, pozostałe cztery łączą się z podstawami pięciu kości śródręcza (będących kośćmi długimi). Najbardziej ruchoma jest kość będąca podstawą kciuka, a całkowicie nieruchoma – kość stanowiąca podstawę palca wskazującego. **Palce** składają się z trzech paliczków (poza kciukiem, zbudowanym z dwóch). Określane są za pomocą nazw zwyczajowych: palec pierwszy to kciuk, palec drugi – wskazujący, palec trzeci – środkowy, palec czwarty – serdeczny, palec piąty – mały.

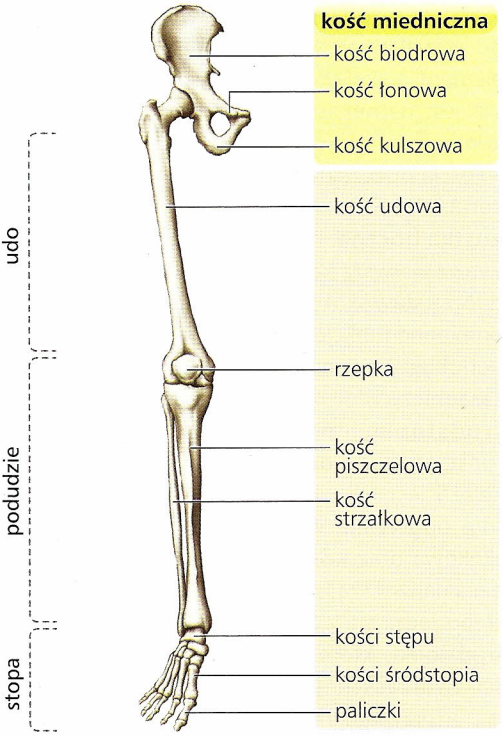


25.11. Szkielet obręczy barkowej i prawej kończyny górnej

? W jaki sposób obręcz barkowa jest połączona ze szkieletem osiowym?

Kończyny dolne

Utrzymanie pionowej postawy ciała umożliwiają człowiekowi duże i wytrzymałe kości kończyny dolnej. Jej szkielet tworzą kości obręczy kończyny dolnej (kości miedniczne) oraz kości kończyny dolnej wolnej (25.12.). **Obręcz kończyny dolnej** zbudowana jest z parzystej **kości miednicznej**, powstałej ze zrośnięcia trzech kości – **biodrowej**, **łonowej** oraz **kulszowej** (rozdzielonych w życiu płodowym). W przedniej stronie ciała obie części kości miednicznej łączą się za pośrednictwem **spojenia łonowego**. W tylnej części pozostają trwale połączone z kością krzyżową. Wszystkie te elementy tworzą pierścień kostny nazywany potocznie **miednicą**. W miejscu styku trzech kości składających się na miednicę znajduje się mocno zagłębiona **panewka stawu biodrowego**. Wraz z głową kości udowej tworzy ona **staw biodrowy**. Budowa miednicy różni się dość wyraźnie w zależności od płci – miednica kobiet



25.12. Szkielet obręczy miednicznej i kończyny dolnej prawej

? Jak kąt ustawienia kości udowej względem kręgosłupa wpływa na dwunożną postawę człowieka?

jest znacznie szersza i niższa niż u mężczyzn. Wynika to z adaptacji ciała do porodu, czego przejawem jest również mniejsze spojenie łonowe u kobiet. Ułatwia to jego rozejście w czasie porodu, dzięki czemu rozchylają się kości biodrowe. Jest to niezbędne, aby płód mógł przedostać się bezpiecznie przez kanał rodny.

Największą i najmasywniejszą kością **kończyny dolnej wolnej** i całego szkieletu jest **kość udowa**. Kości udowe biegną ku dołowi nieco skośnie. W pozycji wyprostowanej kolana prawie się stykają, co pozwala na chodzenie bez konieczności kołysania ciałem na boki (inaczej niż np. u szympansów). Koniec dalszy kości udowej tworzy **staw kolanowy** z kością piszczelową. **Kość piszczelowa** wraz z **kością strzałkową** są zaliczane do **kości goleni** (podudzia) i należą do kości długich. Podobnie jak kości przedramienia są połączone błoną międzykostną, jednak pozostają względem siebie nieruchome. Kość piszczelowa, położona przyśrodkowo, jest grubsza od strzałkowej, stanowi zatem podstawowy element nośny goleni. Mniejsza kość strzałkowa jest natomiast położona zewnętrznie. Jej koniec bliższy tworzy powierzchnię stawową z kością piszczelową, a koniec dalszy jest silnie zgrubiały i widoczny pod skórą jako tak zwana **kostka boczna**. Końce dalsze obu kości goleni wraz z pierwszą **kością stępu** (kością skokową) tworzą staw skokowo-goleniowy. **Stopa** pełni odmienne funkcje niż dłoń, ale wykazuje wiele podobieństw w budowie. Składa się z trzech zasadniczych elementów: **kości stępu**, **śródstopia** i **palców**. Kości stępu funkcjonalnie odpowiadają nadgarstkowi i jest ich siedem. Najważniejszą rolę odgrywają wspomniana kość skokowa oraz **kość piętowa**, będąca największą kością stępu. Kości stępu łączą się z pięcioma kośćmi śródstopia, które są podporą kości tworzących palce. Podobnie jak w przypadku dłoni, każdy palec składa się z trzech paliczków (poza położonym przyśrodkowo paluchem zbudowanym z dwóch). Prawidłowo ukształtowana stopa opiera się o podłoże końcem kości piętowej oraz główką ostatniej, zewnętrznej kości śródstopia. Sklepienie stopy jest wygięte łukowato, co ma duże znaczenie przy sprawnej amortyzacji wstrząsów.

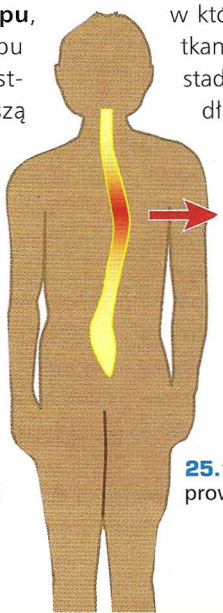
Choroby układu kostnego

Krzywica jest chorobą wieku dziecięcego, występującą najczęściej pomiędzy 2. a 24. miesiącem życia. Powoduje ją trwały niedobór witaminy D_3, co skutkuje zaburzeniami wchłaniania wapnia i złą mineralizacją kości. Typowymi objawami są łukowato wygięte kończyny dolne oraz zdeformowane kości czaszki, nadgarstka i klatki piersiowej. W leczeniu stosuje się doustne preparaty witaminy D_3 oraz eksponowanie dziecka na światło słoneczne (witamina D_3 jest produkowana w skórze pod wpływem promieniowania UV).

Płaskostopie polega na patologicznym obniżeniu fizjologicznych, łukowatych wygięć stopy. Do najczęstszych przyczyn należą nadwaga i noszenie niewłaściwego obuwia. Konsekwencją jest ból oraz przewlekły stan zapalny stawów stopy. W leczeniu stosuje się ćwiczenia ortopedyczne i obuwie korekcyjne.

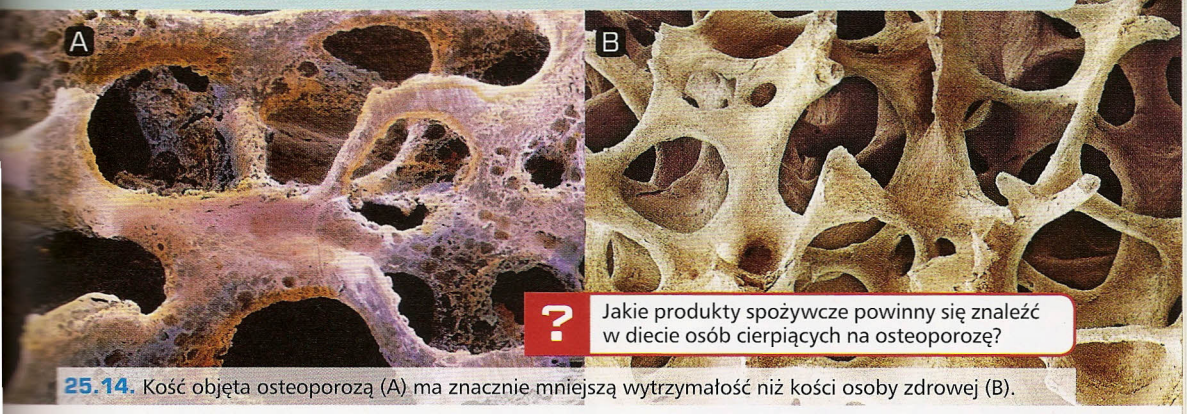
Skolioza to boczne skrzywienie kręgosłupa **(25.13.)**. Pojawia się już w wieku dziecięcym i postępuje z czasem. Jego przyczyną jest nieprawidłowa postawa w pozycji siedzącej oraz noszenie toreb obciążających tylko jedno ramię. W leczeniu stosuje się ćwiczenia korekcyjne, zaleca się również dzieciom noszenie tornistrów (ciężar jest w nich prawidłowo rozłożony).

Osteoporoza jest stanem chorobowym, w którym dochodzi do stopniowego ubytku tkanki kostnej **(25.14.)**. W zaawansowanym stadium objawami są bóle kości (zwłaszcza długich) oraz częste złamania. Choroba pojawia się najczęściej u osób starszych (zwłaszcza kobiet w okresie menopauzy). W leczeniu stosuje się znaczne dawki witaminy D_3 oraz wapnia. Zaleca się również dużo ruchu.



? Jakie złe nawyki prowadzą do wykształcenia się skrzywienia bocznego kręgosłupa?

25.13. Skrzywienie boczne kręgosłupa może prowadzić do licznych i groźnych powikłań.



? Jakie produkty spożywcze powinny się znaleźć w diecie osób cierpiących na osteoporozę?

25.14. Kość objęta osteoporozą (A) ma znacznie mniejszą wytrzymałość niż kości osoby zdrowej (B).

PODSUMOWANIE

- Wyróżnia się kości długie, krótkie, płaskie i różnokształtne.
- Strukturalnie kość zbudowana jest z istoty zbitej i istoty gąbczastej.
- Wśród połączeń kości wyróżnia się ścisłe (więzozrosty, chrząstkozrosty, kościozrosty) oraz ruchome, nazywane stawami.
- W zależności od mechaniki ruchu wyróżnia się następujące typy stawów: kulisty, siodełkowy, zawiasowy oraz obrotowy.
- Szkielet człowieka składa się ze szkieletu osiowego oraz szkieletu kończyn górnych i dolnych.
- W skład szkieletu osiowego wchodzą czaszka, kręgosłup oraz szkielet klatki piersiowej.
- Czaszka zbudowana jest z 23 kości tworzących mózgoczaszkę i trzewioczaszkę.
- Kręgosłup zbudowany jest z 32–34 kręgów podzielonych na funkcjonalne odcinki.
- Każdy kręg składa się z trzonu kręgu (poza atlasem i obrotnikiem) oraz łuku kręgu.
- Klatkę piersiową tworzy 12 par żeber i mostek.
- Szkielet kończyny górnej składa się z obręczy barkowej oraz kości kończyny wolnej górnej.
- Szkielet kończyny dolnej składa się z kości miednicznej oraz z kości kończyny wolnej dolnej.
- Do najczęstszych chorób układu kostnego zalicza się: krzywicę, płaskostopie, skoliozę oraz osteoporozę.

ZADANIA

1. Zaprojektuj doświadczenie, dzięki któremu udowodnisz znaczenie wysokiego stopnia mineralizacji kości dla pełnionej przez nie funkcji.
2. Narysuj schematycznie przekrój dowolnej kości długiej człowieka (np. kości udowej), a następnie nazwij poszczególne jej części, uwzględniając strukturę wewnętrzną.
3. Porównaj funkcje pełnione przez osteoblasty i osteoklasty oraz wyjaśnij, na czym polega znaczenie ciągłej przebudowy kości.
4. Sklasyfikuj połączenia ścisłe występujące pomiędzy elementami szkieletu.
5. Sklasyfikuj połączenia stawowe występujące w szkielecie człowieka.
6. Narysuj schematycznie (za pomocą linii) przebieg krzywizn kręgosłupa człowieka. Nazwij je oraz określ, jaką rolę odgrywają w utrzymaniu pionowej postawy ciała.

BIBLIOGRAFIA

- Gąsiorowski A., *Anatomia funkcjonalna narządu ruchu człowieka*, Wydawnictwo UMCS, 2008.

W INTERNECIE

- http://www.anatomia.webd.pl
- http://www.anatomia24.pl
- http://anatomia.republika.pl

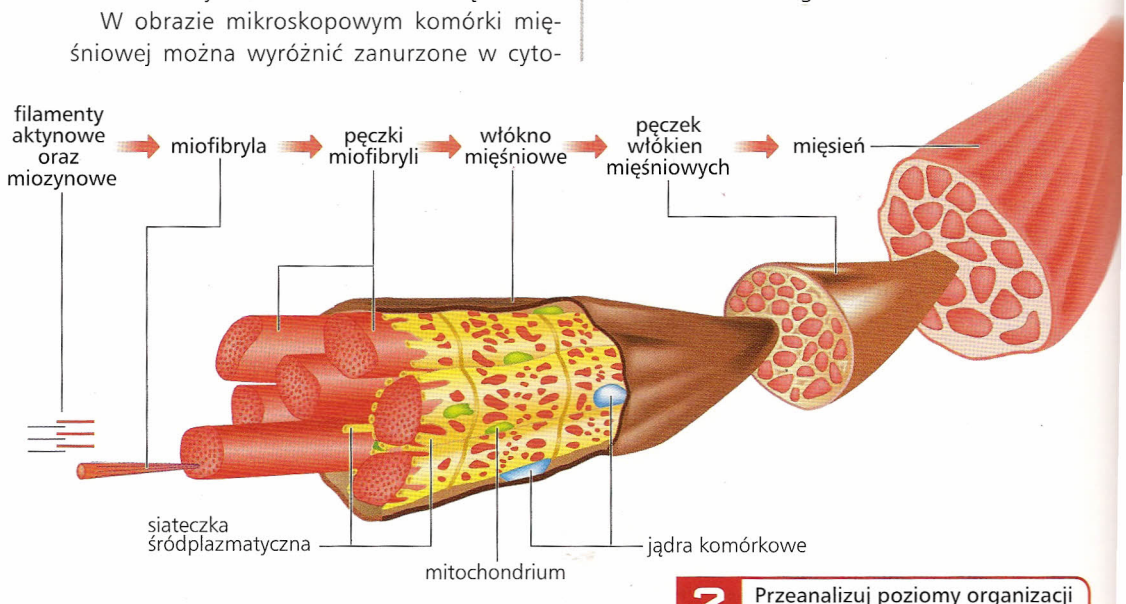
26. Mechanizm skurczu mięśnia

Mięśnie można porównać do biologicznego silnika wykonującego pracę mechaniczną. Pod wpływem impulsów nerwowych zachodzą w nich przemiany biochemiczne. Ich następstwem, niezależnie od rodzaju tkanki mięśniowej, jest skurcz objawiający się skróceniem mięśnia. Większość masy mięśniowej organizmu stanowią poruszane przy udziale świadomości mięśnie poprzecznie prążkowane. Ze względu na rolę i funkcjonalne połączenie z kośćmi szkieletu noszą one nazwę mięśni szkieletowych.

Struktura mięśni

Funkcjonujący mięsień stanowi czynną część aparatu ruchu. Zbudowany jest z pęczków komórek mięśniowych lub inaczej **włókien mięśniowych**. Najważniejszą cechą komórek tego typu jest zdolność do zmiany kształtu, polegającej na zmniejszeniu długości pojedynczego włókna. Proces ten jest możliwy dzięki funkcjonowaniu aparatu kurczliwego zbudowanego z dwóch rodzajów włókien białkowych – **aktyny** oraz **miozyny**. Ich ruch względem siebie powoduje skrócenie się mięśnia i jest najlepiej widoczny w komórkach mięśni szkieletowych. Schemat budowy mięśnia szkieletowego przedstawiono w pierwszej części podręcznika (S. Grabowski, A. Kurek, *Biologia. Zakres rozszerzony*, OPERON, Gdynia 2012, s. 203). W tym rozdziale natomiast szczegółowo omówiono biochemiczny mechanizm skurczu mięśnia.

W obrazie mikroskopowym komórki mięśniowej można wyróżnić zanurzone w cytoplazmie wyraźne pęczki **miofibrylli** (26.1.). Są one zbudowane z pojedynczych włókienek kurczliwych, czyli filamentów aktynowych i miozynowych (określanych również jako **miofilamenty**). Włókna mięśniowe cechuje złożony system błon cytoplazmatycznych i liczne mitochondria. Wszystkie mięśnie szkieletowe są koloru czerwonego, ponieważ występuje w nich **mioglobina**. Związek ten ma strukturę podobną do hemoglobiny, jednak wykazuje większe niż ona powinowactwo wobec tlenu. Podczas intensywnej pracy mięśni, gdy ciśnienie tlenu spadnie poniżej granicznej wartości, mioglobina uwalnia tlen. Pozwala to mitochondriom mięśni na utrzymanie produkcji ATP na drodze oddychania tlenowego. Dzieje się to, zanim zwiększy się podaż tlenu do mięśni za pośrednictwem układu krwionośnego.



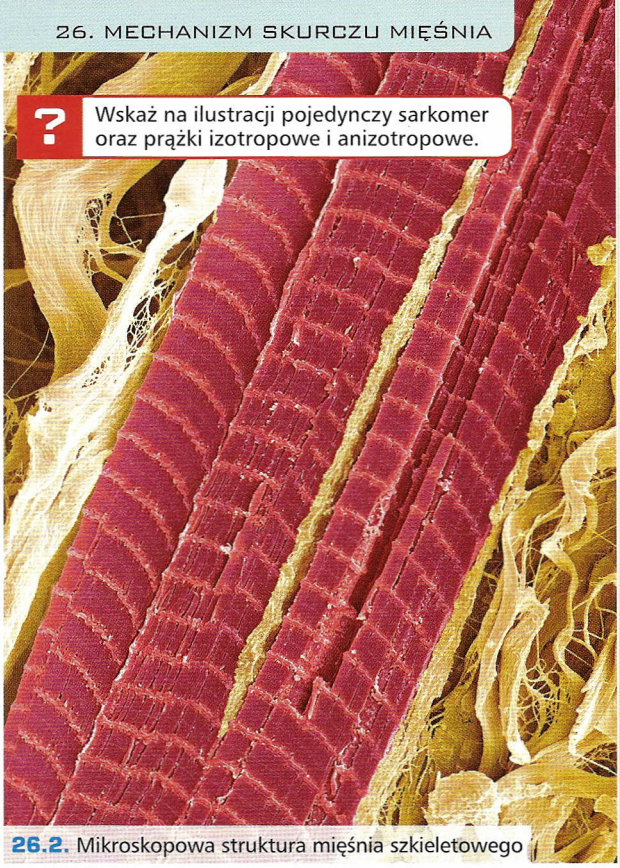
26.1. Szczegółowa budowa mięśnia

? Przeanalizuj poziomy organizacji struktur budujących mięsień.

Struktura miofibryli

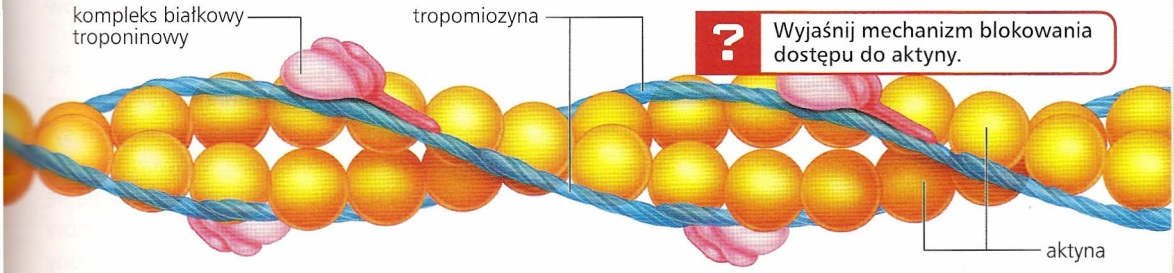
Charakterystyczną cechą miofibryli jest ich poprzeczne prążkowanie, tworzone przez jaśniejsze i ciemniejsze prążki ułożone naprzemiennie (26.2.). Prążki jasne nazywane są **prążkami I** (izotropowymi), a prążki ciemne – **prążkami A** (anizotropowymi). W obszarze prążka I dominują filamenty **aktynowe**, podczas gdy w prążku A przeważający udział ma **miozyna**. Olbrzymia ilość ciasno upakowanych włókienek kurczliwych, w których prążki izotropowe i anizotropowe leżą na tej samej wysokości, daje wrażenie poprzecznego prążkowania całej komórki mięśniowej.

W środkowej części prążka I jest widoczna ciemniejsza linia. To tak zwana **linia Z**, będąca miejscem zakotwiczenia włókien aktyny. Obszar obejmujący połowę prążka I, kompletny prążek A i połowę kolejnego prążka I nosi nazwę **sarkomeru** (26.6.). Stanowi on podstawową jednostkę funkcjonalną włókna mięśniowego. Aby dobrze zrozumieć mechanizm skurczu mięśnia, konieczne jest poznanie struktury filamentów. Dlatego zostanie ona omówiona w pierwszej kolejności.



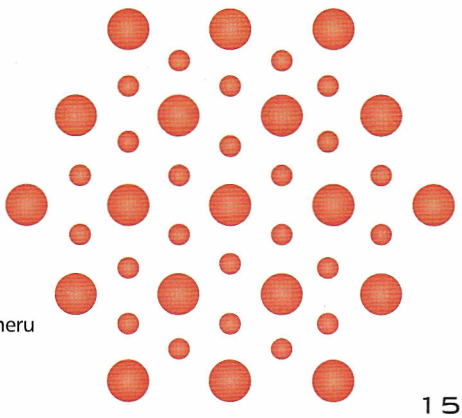
26.2. Mikroskopowa struktura mięśnia szkieletowego

Struktura filamentów aktynowych i miozynowych

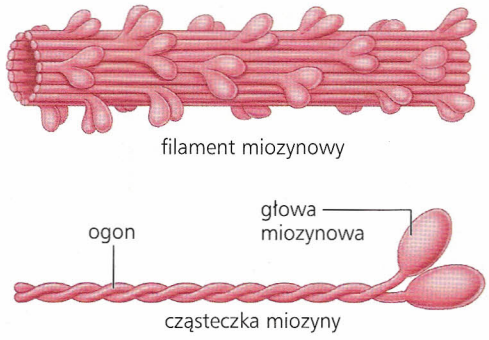


26.3. Struktura globularnej aktyny występującej w mięśniach; na ilustracji widać połączenie aktyny z kompleksami białkowymi troponiny i włóknami tropomiozyny.

Na przekroju poprzecznym miofibryli widać, że każdy gruby miofilament sąsiaduje z sześcioma cienkimi (aktynowymi) (26.4.). Filamenty cienkie (aktynowe) składają się przede wszystkim z aktyny. Związane z nią są też dodatkowe białka (26.3.), które są w stanie wiązać **jony wapnia** (Ca^{2+}). Białka te regulują możliwość wiązania miozyny do filamentów aktynowych.



26.4. Schemat ułożenia włókien aktynowych (cienkie) i miozynowych (grube) na przekroju poprzecznym sarkomeru



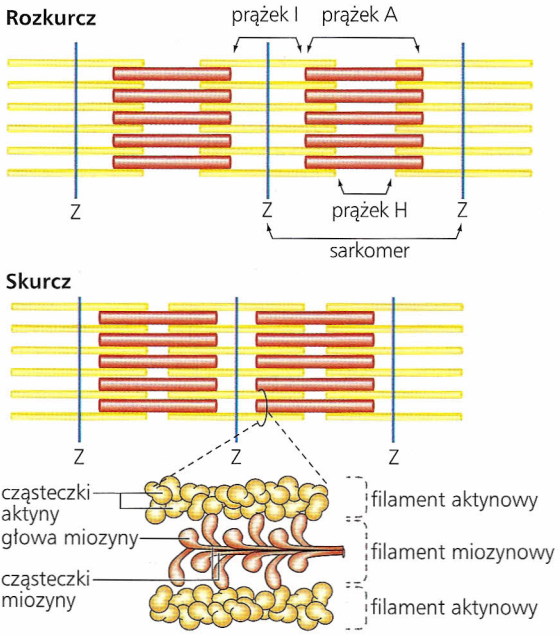
26.5. Struktura miozyny

Miozyna jest dużym białkiem o bardzo silnym powinowactwie do aktyny. Jej pojedyncza cząsteczka zbudowana jest z dwóch części: długiego „ogona" oraz znajdującej się na jego zakończeniu masywnej podwójnej „głowy" **(26.5.)**. Włókno miozynowe powstaje w wyniku spiralnego splecenia szeregu pojedynczych cząsteczek miozyny. Ich ogony tworzą właściwy trzon włókna, podczas gdy głowy wystają z boku i mogą wiązać się do aktyny.

? Określ, czy miozyna jest białkiem globularnym, czy – fibrylarnym.

Mechanika skurczu mięśnia

W trakcie skurczu mięsień może ulegać skróceniu nawet o jedną trzecią swojej pierwotnej długości. Jest to wynikiem wsuwania się miofilamentów cienkich (aktynowych) pomiędzy miofilamenty grube (miozynowe) **(26.6.)**. Mechanizm ten określa się jako **model ślizgowy**. W czasie skurczu nie zmienia się długość miofilamentów, skróceniu ulega natomiast sarkomer (jego elementy bardziej na siebie zachodzą).



26.6. Model struktury sarkomeru w fazach skurczu i rozkurczu

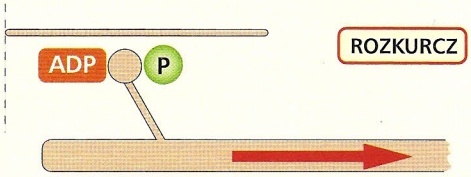
? Porównaj strukturę sarkomeru w fazie skurczu i rozkurczu mięśnia.

Ruch ślizgowy aktyny względem miozyny jest możliwy dzięki zachodzącemu cyklicznie łączeniu i odłączaniu się głów miozynowych i aktyny. Mechanizm ten składa się z następujących faz:

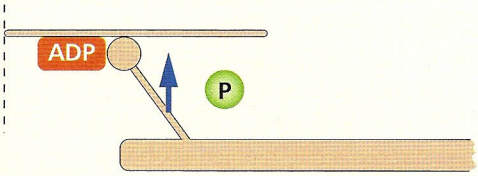
1) **Faza rozkurczu** zachodzi, gdy głowy miozyny nie są zdolne do połączenia z aktyną. Przez cały czas trwania tej fazy ADP i Pi są połączone z głowami miozyny, a wewnątrz włókna stężenie jonów wapnia (Ca^{2+}) utrzymuje się na niskim poziomie. Dzieje się tak dzięki działaniu pomp wapniowych zasilanych ATP. Przemieszczają one jony wapnia z sąsiedztwa miofilamentów do wnętrza otaczających je kanałów i cystern siateczki śródplazmatycznej.
2) **Faza stymulacji** mięśnia rozpoczyna się w momencie przekazania impulsu nerwowego z neuronu na mięsień za pośrednictwem synapsy nerwowo-mięśniowej. Wówczas w błonach siateczki śródplazmatycznej otwierają się kanały jonowe, co umożliwia napływ jonów wapnia w sąsiedztwo miofilamentów. Jony wapnia wiążą się z białkami tworzącymi wraz z aktyną filamenty cienkie. W efekcie aktyna nie jest dłużej osłonięta, a to pozwala na przyłączenie do niej głowy miozyny. Równocześnie od miozyny odłącza się reszta fosforanowa Pi.
3) **Faza ruchu** zachodzi, gdy na skutek odłączenia reszty fosforanowej głowa miozyny, cały czas połączona z aktyną, ulega zgięciu. W wyniku tego cienki miofilament aktynowy przyłączony do miozyny zostaje gwałtownie przesunięty w kierunku centralnej części sarkomeru. Pod koniec tego ruchu z głowy miozyny odłącza się ADP **(26.7.)**.

A

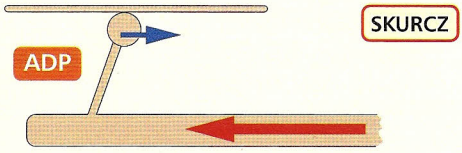
1. wygięcie główki miozyny na skutek hydrolizy ATP



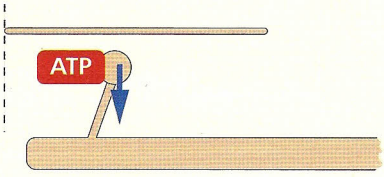
2. odłączenie reszty fosforowej i doczepienie główki miozyny do aktyny



3. odłączenie ADP, odgięcie główki i wsunięcie filamentu grubego

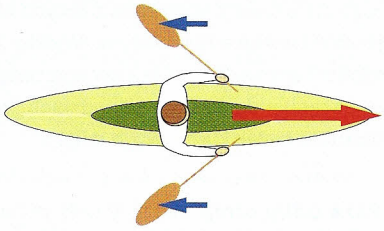


4. relaksacja – odsunięcie główki miozyny od aktyny pod wpływem dołączonego ATP

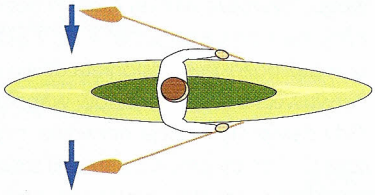


B

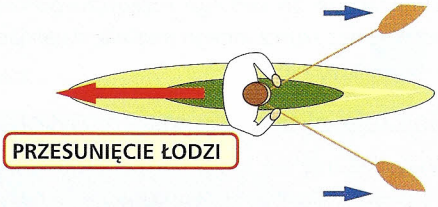
1. przeniesienie wioseł ponad wodą



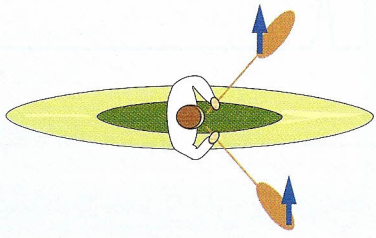
2. zanurzenie wioseł



3. ruch łodzi wywołany ruchem wioseł



4. wyniesienie wioseł ponad wodę



26.7. Schemat przedstawiający biochemiczny mechanizm skurczu mięśnia

? Przeanalizuj kolejne etapy biochemicznego mechanizmu skurczu mięśnia.

:: Ciekawostka

Od dwóch do czterech godzin po śmierci organizmu występuje tak zwane stężenie pośmiertne. Objawia się ono całkowitym skurczem mięśni szkieletowych oraz mięśnia sercowego. To efekt braku tlenu, który skutkuje ustaniem syntezy ATP. Niedobór ATP powoduje, że głowy miozyny pozostają trwale połączone z aktyną w fazie ciągłego skurczu. Co więcej, włókna aktyny pozostają stale odsłonięte dla miozyny. Wynika to z niemożności wypompowania jonów wapnia poza obręb miofilamentów (na skutek ustania aktywności pompy wapniowej zasilanej ATP). Skurcz pośmiertny ustępuje dopiero po kilku dniach, w wyniku rozpoczęcia procesów gnilnych prowadzących do rozkładu białek kurczliwych mięśni.

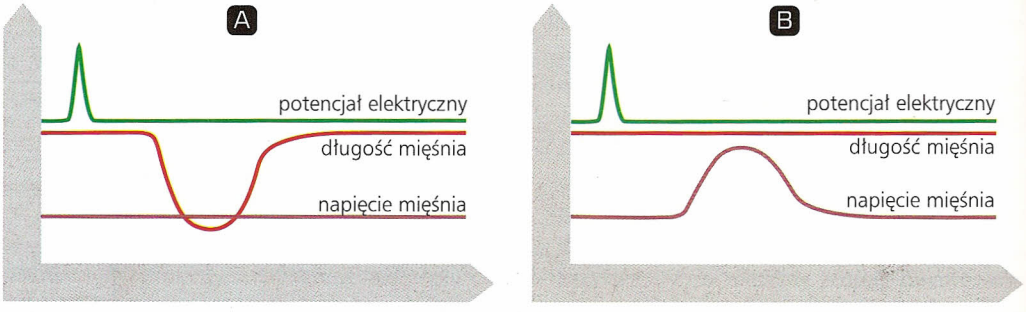
4) **Faza odłączenia** miozyny polega na tym, że głowa miozyny (po odłączeniu ADP) natychmiast wiąże się z nową cząsteczką ATP, bogatą w energię. Tylko w taki sposób może odłączyć się od aktyny oraz wrócić do kształtu wyjściowego. Hydroliza ATP do ADP i Pi pozwala miozynie na kolejne połączenie się z aktyną, o ile ta wciąż pozostaje odsłonięta dzięki stymulacji nerwowej i obecności jonów wapnia.

Gdy ustaje stymulacja nerwowa mięśnia, zamykają się kanały jonowe siateczki sarkoplazmatycznej. Wówczas stale działająca, zasilana przez ATP pompa wapniowa usuwa ten pierwiastek z sąsiedztwa miofilametów. Powoduje to ponowne zablokowanie aktyny przez towarzyszące jej białka i ustąpienie skurczu mięśnia. Należy jednak pamiętać, że do pełnego rozkurczu potrzebny jest również skurcz innego mięśnia, działającego antagonistycznie.

Rodzaje skurczów mięśniowych

Wszystkie mięśnie szkieletowe trwają w stanie ciągłego „pogotowia skurczowego", nazywanego **napięciem stałym** (lub tonusem). Jego utrzymanie jest możliwe dzięki słabym impulsom nerwowym, docierającym do mięśnia za pośrednictwem synaps nerwowo-efektorowych. Tonus ustaje całkowicie w fazie snu REM, w czasie pełnego znieczulenia (np. w trakcie operacji) oraz po śmierci.

Tkanka mięśniowa poprzecznie prążkowana może podlegać dwóm rodzajom skurczów. Pierwszym z nich jest tak zwany **skurcz izotoniczny**, który występuje, gdy dochodzi do skrócenia mięśnia, jednak bez zmiany jego napięcia (tonusu). Z kolei **skurcz izometryczny** zachodzi, gdy wzrasta napięcie mięśnia, ale nie zmienia się jego długość (np. gdy dwie kończyny zostają zablokowane w jednej pozycji). W warunkach fizjologicznych mięśnie najczęściej wykonują określoną pracę, pokonując pewien opór. Skurcz mięśni dzieli się wówczas na dwie fazy. W pierwszej wzrasta napięcie mięśniowe, lecz długość mięśnia się nie zmienia (jest to faza izometryczna skurczu). Później jednak siła skurczu wzrasta, co umożliwia pokonanie oporu i skrócenie mięśnia (to faza izotoniczna skurczu). Taki złożony skurcz mięśniowy nosi nazwę **skurczu auksotonicznego** (26.8.).



26.8. Charakterystyczne cechy skurczu izotonicznego (A) oraz izometrycznego (B) mięśni szkieletowych

? Porównaj skurcz izotoniczny i izometryczny mięśnia szkieletowego.

PODSUMOWANIE

- Podstawową jednostką funkcjonalną tkanki mięśniowej jest włókno mięśniowe.
- Skrócenie się mięśnia jest możliwe dzięki obecności aparatu kurczliwego zbudowanego z białek – aktyny i miozyny.
- W budowie komórki mięśniowej widać układające się naprzemiennie prążki jasne (I) oraz ciemne (A).
- Białka towarzyszące w filamentach cienkich aktynie decydują o jej dostępności dla drugiego białka kurczliwego – miozyny.
- Model skurczu mięśnia jest nazywany ślizgowym i polega na wsuwaniu się włókien aktyny pomiędzy włókna miozyny.
- W skurczu mięśnia kluczową rolę odgrywają jony Ca^{2+}, odblokowujące aktynę, oraz miozyna, wykazująca silne powinowactwo do aktyny.
- Podczas skurczu mięśnia ujawnia się rola miozyny jako ATP-azy, czyli enzymu prowadzącego rozpad ATP do ADP, podczas którego uwalniana jest energia potrzebna do wykonania skurczu.

ZADANIA

1. Scharakteryzuj szczegółowo budowę typowego mięśnia szkieletowego.
2. Scharakteryzuj budowę strukturalną sarkomeru.
3. Spróbuj przewidzieć, jakie konsekwencje dla skurczu sarkomeru miałby brak linii Z.
4. Opisz mechanizm regulacji skurczu mięśnia za pomocą jonów wapnia.

BIBLIOGRAFIA

- McMahon T. A., *Muscles, Reflexes and Locomotion*, 1st Edition, Princeton University Press, Princeton 1984.
- Roberts T. M., Stewart M., *Nematode sperm: amoeboid movement without actin*, „Trends in Cell Biology" September 1997, 7(9), s. 368–373.
- Sokołowska-Pituchowa J., *Anatomia człowieka*, PZWL, Warszawa 2008.

W INTERNECIE

- http://www.zanikmiesni.org.pl/dbanie-o-kondycje-miesni



27. Główne grupy mięśni

W skład układu mięśniowego człowieka wchodzi około 600 **mięśni**, które w zależności od płci stanowią od 30 do 40% masy organizmu. Ich zdolność do skurczu sprawia, że pełnią funkcję struktur odpowiedzialnych za wykonywanie różnego typu ruchów. Przykładowo: świadome skurcze mięśni poprzecznie prążkowanych szkieletowych umożliwiają zmianę położenia ciała (chód, bieg, podnoszenie przedmiotów, pisanie). Pozwalają też na ruchy niezwiązane ze zmianami pozycji, jak oddychanie, mówienie).

Budowa funkcjonalnej części mięśnia

Główną masę samodzielnego anatomicznie mięśnia szkieletowego stanowi środkowa część, zwana **brzuścem**. Na jego zakończeniach znajdują się **ścięgna** tworzone przez tkankę łączną włóknistą zbitą. Typowy brzusiec może składać się z jednej części lub rozdzielać się na jednym końcu na kilka tak zwanych głów mięśniowych. Prowadzi to do powstania mięśni dwugłowych, trójgłowych oraz czterogłowych, o odpowiednio większej liczbie przyczepów do kości. Włókna tworzące ścięgna przenikają przez okostną oraz kość, łącząc mięśnie i kości w funkcjonalny układ ruchu.

Charakterystyczną cechą mięśni jest ich bogate unaczynienie, którego powodem jest niezwykle intensywny metabolizm zachodzący w trakcie skurczu. Wymaga on dostarczenia olbrzymich ilości tlenu oraz substancji odżywczych (obliczono, że 1 cm^2 mięśni szkieletowych jest zaopatrywany w krew przez blisko 2000 naczyń włosowatych).

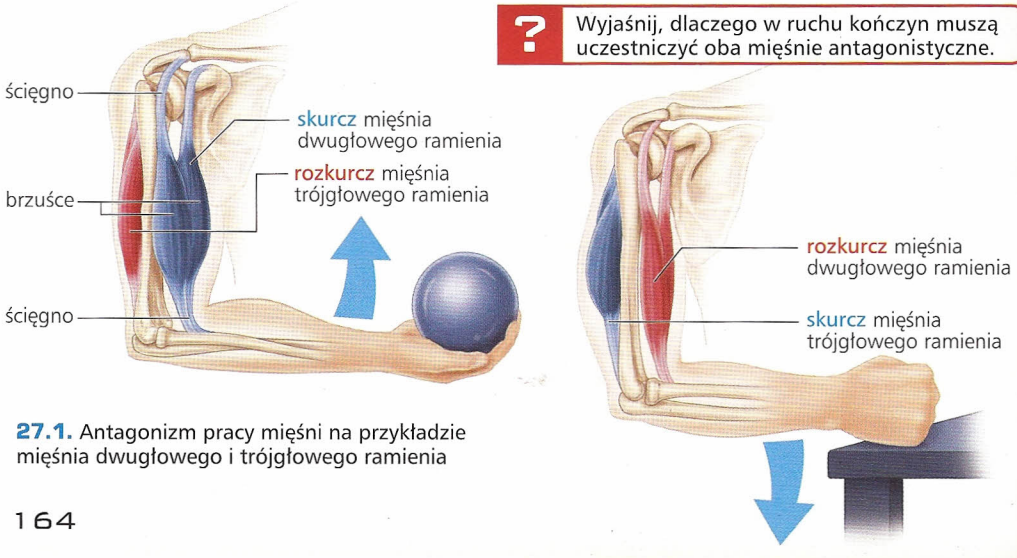
Aby mogło dojść do skurczu mięśnia szkieletowego, musi dotrzeć do niego impuls przekazany za pośrednictwem neuronów ruchowych. W mięśniu akson komórki nerwowej się rozgałęzia, dociera zakończeniami do poszczególnych włókien mięśniowych. Pojedyncza komórka nerwowa może wzbudzić od 10 do 200 komórek mięśniowych, w wyniku czego tworzy tak zwaną **jednostkę motoryczną** (ruchową). Im więcej włókien mięśniowych zostaje pobudzonych przez

Podział mięśni ze względu na liczbę przyczepów	
Typ	**Przykłady**
mięsień jednobrzuścowy	mięsień prostownik długi kciuka, mięsień krawiecki
mięsień dwugłowy	mięsień dwugłowy ramienia, mięsień dwugłowy uda
mięsień trójgłowy	mięsień trójgłowy ramienia, mięsień trójgłowy łydki
mięsień czterogłowy	mięsień czterogłowy uda

:: Ciekawostka

Okazuje się, że nie wszystkie mięśnie są przyczepione do kości. Przykładem mogą być mięśnie języka, przymocowane do błon śluzowych. Z kolei mięśnie mimiczne twarzy są przytwierdzone jednym końcem do kości czaszki, a drugim – do struktur włóknistych skóry właściwej.

? Wyjaśnij, dlaczego w ruchu kończyn muszą uczestniczyć oba mięśnie antagonistyczne.



27.1. Antagonizm pracy mięśni na przykładzie mięśnia dwugłowego i trójgłowego ramienia

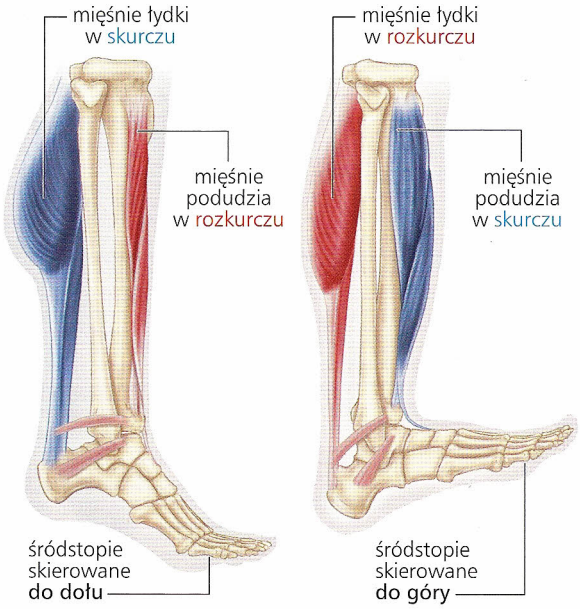
Mięśnie wykazujące działanie antagonistyczne		
Specjalizacja mięśnia	**Sposób działania**	**Przykład**
zginacze	zgina kończynę w stawie	mięsień dwugłowy ramienia
prostowniki	prostuje kończynę w stawie	mięsień trójgłowy ramienia
przywodziciele	przywodzą część ciała lub kończynę do osi głównej ciała lub kończyny	mięsień przywodziciel kciuka
odwodziciele	odwodzą część ciała lub kończynę od osi głównej ciała lub kończyny	mięsień odwodziciel kciuka
dźwigacze	podnoszą daną część ciała	mięsień dźwigacz łopatki
obniżacze	obniżają daną część ciała	mięsień obniżacz kąta ust
nawracacze	skręcają część ciała w dół i ku tyłowi	mięsień nawrotny obły
odwracacze	skręcają część ciała do przodu i ku górze	mięsień odwracacz kości łokciowej
zwieracze	zamykają otwór ciała	mięsień zwieracz pęcherza
rozwieracze	otwierają otwór ciała	mięsień rozwieracz źrenicy

jeden neuron, tym kontrola skurczu mięśnia jest mniej precyzyjna. Dlatego w mięśniach wykonujących skomplikowane ruchy (np. poruszających gałką oczną) każde włókno mięśniowe kontrolowane jest przez osobny neuron ruchowy.

Antagonizm pracy mięśni szkieletowych

Ruch wykonywany za pośrednictwem mięśni szkieletowych jest możliwy dzięki temu, że istnieją wśród nich dwie grupy czynnościowe, które działają wobec siebie antagonistycznie (przeciwstawnie) **(27.2.)**. Dobrym przykładem są mięśnie odpowiedzialne za zginanie i prostowanie przedramienia **(27.1.)**. Położony z przodu kości ramiennej **mięsień dwugłowy ramienia** odgrywa rolę **zginacza**. Oznacza to, że w następstwie jego skurczu dochodzi do zgięcia przedramienia w stawie łokciowym. Antagonistycznym wobec niego mięśniem jest położony z tyłu kości ramiennej **mięsień trójgłowy ramienia.** Jego skurcz powoduje wyprostowanie zgiętego w stawie łokciowym przedramienia, zatem mięsień ten pełni funkcję **prostownika**.

Poza mięśniami antagonistycznymi istnieje duża grupa mięśni, które celem wykonania określonego ruchu muszą współdziałać ze sobą, co zwiększa ich skuteczność. To tak zwane **mięśnie synergistyczne**, których najlepszym przykładem są mięśnie międzyżebrowe, biorące udział w zwiększaniu pojemności klatki piersiowej w trakcie wdechu.



27.2. Antagonizm pracy mięśni kończyny dolnej

:: Ciekawostka

W trakcie wykonywania złożonych ruchów (np. podczas tańca) wszystkie działające antagonistycznie mięśnie danej kończyny pozostają w fazie skurczu, z tym że jedne kurczą się silniej, a drugie – słabiej. Pozwala to na zachowanie płynności ruchu i zapobiega nadmiernemu naciąganiu mięśni.

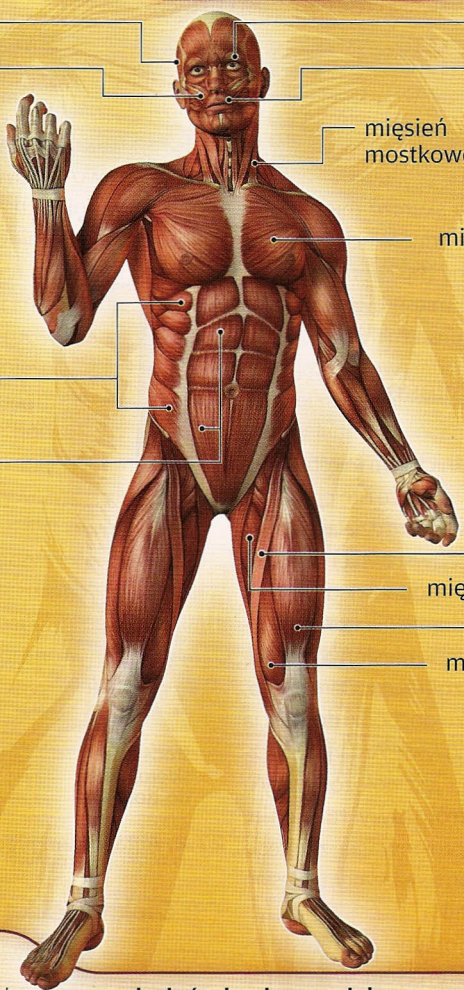
GŁÓWNE GRUPY MIĘŚNI

Ze względu na topografię ciała człowieka najczęściej dzieli się mięśnie na:

- mięśnie grzbietu
- mięśnie klatki piersiowej
- mięśnie brzucha
- mięśnie obręczy barkowej i kończyny górnej
- mięśnie obręczy miednicznej i kończyny dolnej
- mięśnie głowy i szyi

Mięśnie brzucha

Największym mięśniem tej części ciała jest **mięsień prosty brzucha**, rozciągający się w środkowej części między mostkiem a kością łonową. Funkcja mięśnia prostego brzucha polega przede wszystkim na zginaniu tułowia do przodu. Jest on również częścią tak zwanej **tłoczni brzusznej** (używanej w trakcie defekacji lub podczas porodu) oraz najsilniejszym antagonistą mięśni tworzących układ prostownika grzbietu.

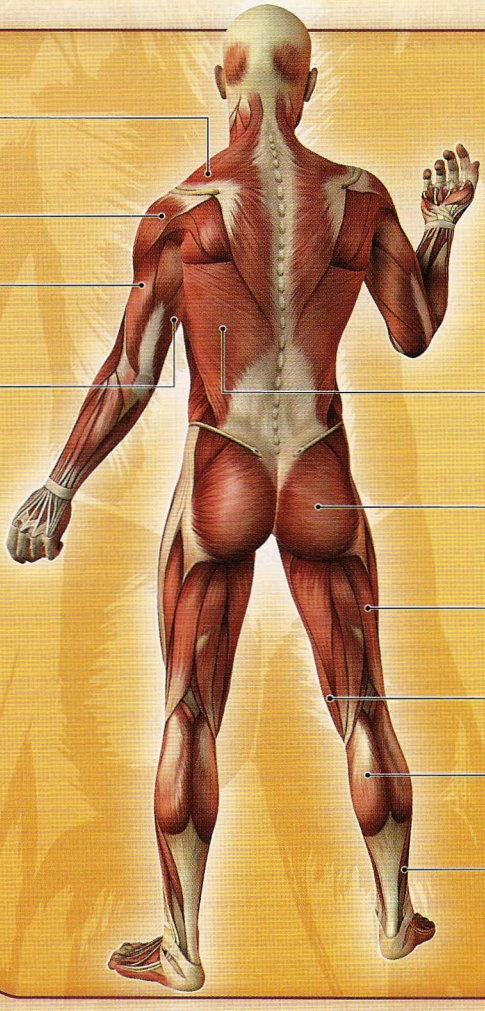


Mięśnie klatki piersiowej

Najważniejszymi mięśniami tego obszaru są: **mięsień piersiowy większy** oraz **mniejszy**. Oba mają kształt trójkątny i przyłączają się do obojczyka, mostka, żeber oraz kości ramiennej. Odpowiadają za przywodzenie i skręt ramienia w kierunku tułowia. Pełnią też pomocnicze funkcje wdechowe. Mięśnie międzyżebrowe leżą w przestrzeniach międzyżebrowych. **Przepona** jest najważniejszym mięśniem oddechowym (wdechowym), a także jednym z najsilniejszych mięśni (spotykanym jedynie u ssaków). Stanowi przegrodę oddzielającą jamę klatki piersiowej od jamy otrzewnej. W przeponie zlokalizowane są otwory, przez które przechodzą: aorta, przełyk oraz nerw błędny.

Mięśnie głowy i szyi

Mięśnie głowy dzieli się na dwie ważne grupy. Pierwszą z nich są **żwacze**, poruszające **żuchwą**. Dzięki skoordynowanemu działaniu tych mięśni możliwe jest żucie oraz rozgryzanie pokarmu. Druga grupa to **mięśnie mimiczne**. Ich budowę charakteryzuje to, że jeden z przyczepów połączony jest z kośćmi czaszki, podczas gdy drugi – z włóknistymi strukturami skóry właściwej. Mięśnie te pozwalają na wyrażanie emocji (jak gniew, złość, strach, radość) przez nadawanie twarzy odpowiedniego wyrazu oraz umożliwiają otwieranie i zamykanie naturalnych otworów ciała (jak usta, oczy).
Mięśnie szyi pozwalają na obrót i pochylanie głowy. Wspomagają również opuszczanie żuchwy, ruchy językiem oraz połykanie.



Mięśnie grzbietu

Na powierzchni leżą szerokie mięśnie, które biegną głównie w kierunku kończyny górnej. Do najważniejszych z nich zalicza się: mięsień **czworoboczny grzbietu** (unoszący i obniżający bark oraz przyciągający łopatkę do kręgosłupa w postawie „na baczność"), mięsień **najszerszy grzbietu** (opuszczający podniesione ramię) oraz mięsień **dźwigacz łopatki** (podciągający łopatkę ku górze i przyśrodkowo). Leżące pod nimi mięśnie to **układ prostownika grzbietu**. Zlokalizowane są w środkowej jego części, sięgają od kości ogonowej aż do czaszki. Przy skurczu jednostronnym umożliwiają one wygięcia boczne kręgosłupa, a przy skurczu obustronnym zginają kręgosłup do tyłu, działając antagonistycznie wobec mięśni brzucha.

Mięśnie obręczy barkowej i kończyny górnej

Mięśnie obręczy barkowej odpowiadają za połączenie łopatki i obojczyka z kością ramienną. Największym z nich jest **mięsień naramienny**, leżący powierzchniowo. Jego różne części odpowiadają za unoszenie, a także obrót ramienia na zewnątrz i do wewnątrz oraz przywodzenie ramienia do tyłu i do przodu.

Mięśnie ramienia dzielą się funkcjonalnie na dwie grupy: zginacze położone z przodu oraz prostowniki zlokalizowane z tyłu ramienia. Odpowiedzialne są za siłę i precyzję ruchów przedramienia.

Mięśnie przedramienia odpowiadają za odwracanie i nawracanie przedramienia. Należą do nich również mięśnie poruszające palcami dłoni.

Mięśnie ręki są krótkie, leżą po stronie dłoniowej ręki oraz pomiędzy kośćmi śródręcza i odpowiadają za precyzyjne ruchy poszczególnych palców. Po grzbietowej stronie ręki mięśnie w ogóle nie występują, a ich miejsce zajmują ścięgna mięśni przedramienia.

Mięśnie obręczy miednicznej i kończyny dolnej

Mięśnie tej części ciała są szczególnie dobrze rozwinięte, co jest następstwem pionowej postawy ciała i dwunożnej lokomocji człowieka.

Największym spośród mięśni obręczy miednicznej jest **mięsień pośladkowy wielki**, o kształcie rombu. To on w głównej mierze odpowiada za utrzymanie pionowej postawy w czasie stania i chodzenia. Poza tym jest również mięśniem prostownikiem stawu biodrowego (potrzebnym np. przy wstawaniu z klęczek).

Trzema najważniejszymi **mięśniami uda** są: **mięsień krawiecki**, **mięsień czworogłowy uda** oraz **mięsień dwugłowy uda**. Mięsień krawiecki umożliwia zginanie stawu biodrowego oraz kolanowego, a także pozwala na obrót uda na zewnątrz. Ruchem, w którym mięsień krawiecki bierze istotny udział, jest zakładanie nogi na nogę. Mięsień czworogłowy uda jest jedynym prostownikiem stawu kolanowego, uczestniczy też w podnoszeniu uda w trakcie chodzenia. Mięsień dwugłowy uda odpowiada za zginanie nogi w kolanie.

Mięśnie podudzia odpowiadają za zginanie i prostowanie stopy. Najbardziej charakterystycznym spośród nich jest **mięsień trójgłowy łydki**, położony w części tylnej. Mięsień ten przechodzi w dolnej części łydki w **ścięgno piętowe** (tzw. **ścięgno Achillesa**). Mięsień trójgłowy łydki odpowiada za odrywanie pięty od podłoża podczas biegania i chodzenia.

Mięśnie stopy to krótkie mięśnie, które odpowiadają za ruch palców, ale również usztywniają stopę we wszystkich płaszczyznach (wyróżnia się mięśnie grzbietu stopy oraz mięśnie podeszwowe).

Czynniki wpływające na prawidłowy rozwój muskulatury ciała

Rozwój cywilizacyjny, do którego doszło w ciągu kilku ostatnich pokoleń, zaowocował licznymi udogodnieniami zmniejszającymi fizyczne obciążenia organizmu. Ich efektem stało się ograniczenie aktywności ruchowej ludzi. W połączeniu z nieprawidłowymi nawykami żywieniowymi (jak spożywanie zbyt kalorycznych pokarmów) i stresem towarzyszącym codziennemu życiu doprowadziło to do rozwoju licznych schorzeń. Określa się je jako choroby cywilizacyjne, a zalicza się do nich: chorobę niedokrwienną serca, zawał serca, otyłość, nerwice. Dzięki postępowi technicznemu człowiek oddalił się więc od swych przodków żyjących w środowisku stawiającym więcej wyzwań. Jednak niezależnie od tego, ruch i aktywność fizyczna są nierozerwalnie związane z ludzką naturą.

Początek rozwoju sprawności ruchowej człowieka następuje jeszcze w życiu płodowym i ma postać pozornie nieskoordynowanych ruchów kończyn wyczuwanych przez matkę (już od ok. 20. tygodnia ciąży). W chwili narodzin dziecko jest wyposażone we wszystkie niezbędne do życia mięśnie, które z początku są bardzo słabo rozwinięte i delikatne. Przy swojej niewielkiej długości nie są zdolne do podźwignięcia ciężaru ciała ani do zapewnienia mu odpowiedniej koordynacji ruchów. Z czasem mięśnie, poddawane działaniu różnych sił, rozwijają się i pogrubiają, dzięki czemu zwiększają swą sprawność.

Harmonijny rozwój mięśni jest niezbędnym warunkiem prawidłowego wykształcenia wciąż kostniejącego szkieletu. W trakcie pracy mię-

śni poprawia się ukrwienie kości, a co za tym idzie, są one lepiej zaopatrywane w niezbędne składniki odżywcze i tlen. Dlatego istotne jest, aby od najmłodszych lat stymulować rozwój mięśni za pomocą ćwiczeń. Ważne jest również, aby poprzez niehigieniczne warunki pracy w szkole i w domu (jak garbienie się w pozycji siedzącej, noszenie plecaków obciążających jedno ramię) nie doprowadzić do pojawienia się wad postawy. Systematyczne i równomierne obciążanie układu mięśniowego sprzyja rozwijaniu masy mięśniowej, podczas gdy zaprzestanie używania danej grupy mięśni prowadzi do ich zaniku. Jeżeli regularnie uprawia się ćwiczenia fizyczne, należy pamiętać o konieczności przeprowadzania poprzedzającej je rozgrzewki. Jest ona niezmiernie ważna, pozwala bowiem na rozluźnienie i rozciągnięcie zesztywniałych mięśni oraz stawów. Poprawia również krążenie krwi, ponieważ wysyca mięśnie odpowiednią ilością tlenu i przygotowuje je do wytężonej pracy w warunkach tlenowych.

PODSUMOWANIE



- Brzusiec mięśnia może być zbudowany z jednej części bądź podzielony na fragmenty (tzw. głowy).
- Ze względu na liczbę głów wyróżnia się mięśnie: jednobrzuścowe, dwugłowe, trójgłowe, czterogłowe.
- Włókna mięśniowe unerwiane przez jeden neuron ruchowy noszą nazwę jednostki motorycznej (ruchowej).
- Ruch kończyn jest możliwy dzięki współpracy mięśni działających w sposób antagonistyczny.
- Ze względu na topografię ciała człowieka wyróżnia się mięśnie: grzbietu, klatki piersiowej, brzucha, obręczy barkowej i kończyny górnej, obręczy miednicznej i kończyny dolnej oraz mięśnie głowy i szyi.
- Jednym z największych mięśni ciała człowieka jest przepona, która oddziela jamę otrzewnej od jamy opłucnej.
- Czynniki ułatwiające harmonijny rozwój muskulatury mają również korzystny wpływ na rozwój kośćca.

ZADANIA



1. Wskaż i scharakteryzuj grupy mięśni odpowiedzialne za wyginanie kręgosłupa do przodu oraz do tyłu.
2. Udowodnij, że na precyzję działania jednostki motorycznej mięśnia ma wpływ liczba docierających do efektora zakończeń nerwowych.
3. Oceń, jak szczelność przepony wpływa na pełnioną przez nią funkcję mięśnia oddechowego.

BIBLIOGRAFIA



- Ignasiak Z., *Anatomia układu ruchu*, Urban & Partner Wydawnictwo Medyczne, 2012.

W INTERNECIE



- http://www.innerbody.com/image/musfov.html

28. Energia i aktywność fizyczna

Mięśnie można porównać do silnika, w którym energia chemiczna zostaje zamieniona na mechaniczną. Proces spalania mieszanki paliwowej w obecności tlenu umożliwia silnikowi działanie. Podobna sytuacja zachodzi we włóknach mięśniowych, ale paliwem są zmagazynowane w nich węglowodany oraz kwasy tłuszczowe. Pozyskiwana z nich energia w postaci ATP pozwala mięśniom na wykonanie **ruchu**.

Zapotrzebowanie mięśni na energię

Związkiem dostarczającym energię potrzebną do skurczu włókna mięśniowego jest jest adenozynotrifosforan (**ATP**). Niewielki zapas zmagazynowanego we włóknie mięśniowym adenozynotrifosforanu starcza zwykle na wykonanie kilku skurczów.

Do podtrzymania aktywności mięśni konieczne jest więc stałe dostarczanie energii wytwarzanej z innych, znajdujących się w tkance mięśniowej substratów energetycznych. W zależności od tego, jak duże jest w danej chwili zapotrzebowanie na energię, komórki mięśniowe mogą pozyskiwać energię w postaci ATP na trzy różne sposoby:

- wykorzystując fosfokreatynę
- dzięki fermentacji mleczanowej (wykorzystując glukozę)
- poprzez oddychanie tlenowe (korzystając z glukozy i wolnych kwasów tłuszczowych).

Fosfokreatyna

Jest to biochemiczny mechanizm pozwalający na niemal natychmiastowe wygenerowanie porcji energii w postaci ATP. Ulega on aktywacji natychmiast po rozpoczęciu wytężonej pracy mięśni, a głównym związkiem chemicznym biorącym udział w zachodzących reakcjach jest **fosfokreatyna** (**CP**). Niezależnie od obecności tlenu błyskawicznie przenosi ona wysokoenergetyczną grupę fosforanową na ADP, prowadząc do wytworzenia ATP **(28.1.)**. Enzymem, który odpowiada za przeniesienie reszty fosforanowej jest kinaza kreatynowa.

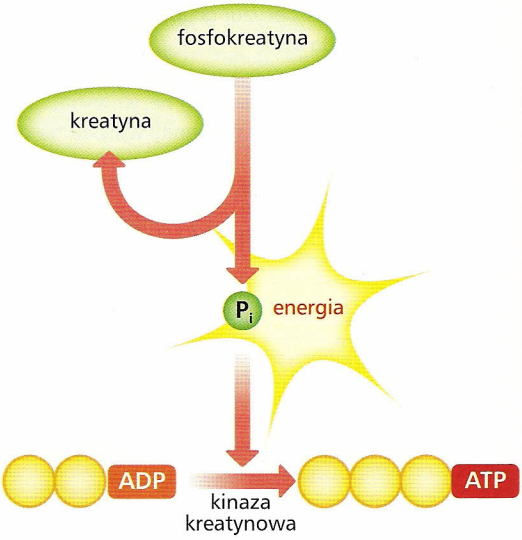
Fosfokreatyna stanowi najważniejsze źródło energii w początkowej fazie intensywnego wysiłku (np. w trakcie biegu sprinterskiego). Niewielka ilość fosfokreatyny zmagazynowanej w mięśniach pozwala na utrzymanie pracy mięśni przez mniej więcej 10 sekund.

Aby możliwe było kontynuowanie działania mięśni, muszą one skorzystać ze źródeł ATP generowanych w innych procesach.

Fermentacja mleczanowa

Nieco więcej ATP włókna mięśniowe uzyskują w wyniku przekształcenia znajdującej się w nich glukozy w kwas mlekowy (mleczan). Proces ten rozpoczyna się po 10 sekundach intensywnej pracy mięśni, a zatem w momencie, gdy zawarte w nich zapasy fosfokreatyny zaczynają się wyczerpywać.

Fermentacja mleczanowa **(28.2.)** zachodzi wolniej niż tworzenie ATP z udziałem fosfokreatyny. Pozwala jednak na dłuższy wysiłek fizyczny.



28.1. Powstawanie ATP przy udziale fosfokreatyny

Jak wiesz z rozdziałów 7. i 8., fermentacja mleczanowa zachodzi bez udziału tlenu. Dostarcza jednak znacznie mniej energii niż oddychanie tlenowe, wymaga poza tym usunięcia powstającego kwasu mlekowego. Fermentacja mleczanowa ma zatem największe znaczenie w momencie, gdy mięśnie pracują na tyle intensywnie, że mioglobina i krew nie są w stanie dostarczyć wystarczająco dużo tlenu dla podtrzymania oddychania tlenowego. Ważną zaletą fermentacji mleczanowej jest też większa szybkość produkcji energii niż podczas oddychania tlenowego, co również ma duże znaczenie podczas intensywnego wysiłku. Jest to możliwe, ponieważ wszystkie przemiany fermentacji mleczanowej zachodzą w cytoplazmie.

Oddychanie tlenowe

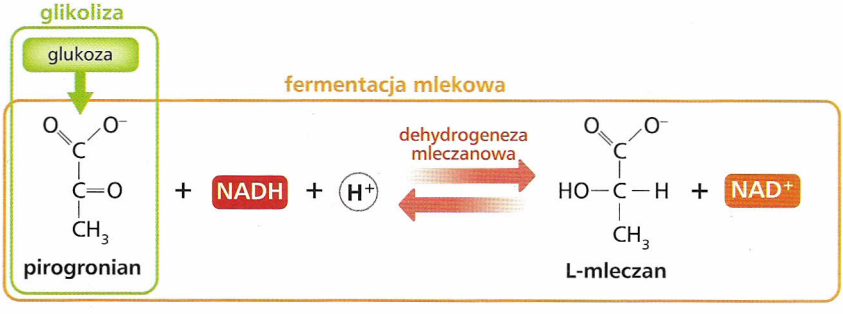
W czasie biegu sprinterskiego ATP jest wytwarzane w mięśniach z szybkością, jakiej nie da się utrzymać podczas trwającego dłużej wysiłku fizycznego. Dla przykładu, rekord świata w biegu na dystansie 1000 metrów wynosi 131,96 sekundy, a więc sporo powyżej dwóch minut. W tej sytuacji organizm zawodnika nie może polegać wyłącznie na fosfokreatynie czy fermentacji mleczanowej. Jest tak, ponieważ przed osiągnięciem mety zarówno zapasy fosfokreatyny, jak i NAD^+ wyczerpałyby się szybciej, niż nastąpiłaby ich regeneracja. Zatem energia zużywana w czasie biegu długodystansowego (czy innego dłuższego wysiłku) pochodzi w przeważającej mierze z fosforylacji oksydacyjnej (tlenowej). Ponieważ w trakcie uwalniania dużej ilości energii za pośrednictwem systemu tlenowego konieczne jest zaangażowanie mitochondriów, wytwarzanie ATP na tej drodze przebiega znacznie wolniej niż w dwóch poprzednich systemach. Przekłada się to na wolniejsze tempo biegu. Głównym źródłem energii w oddychaniu tlenowym są, podobnie jak w systemie beztlenowym, zapasy glukozy zmagazynowane w mięśniach w postaci glikogenu (glikogen wątrobowy jest dla nich dostępny w niewielkim stopniu) **(28.3.)**.

Z kolei aby utrzymać pracę mięśni podczas biegu maratońskiego (o dystansie 42,2 km), organizm wykorzystuje jeszcze inne substraty energetyczne. Zapasy glikogenu w mięśniach wystarczyłyby bowiem do wygenerowania około 100 moli ATP, a w trakcie maratonu człowiek potrzebuje ich przeciętnie nawet 150. Dlatego głównym źródłem energii w czasie takiego intensywnego wysiłku stają się kwasy tłuszczowe zmagazynowane w tkance tłuszczowej. Jeśli uwzględni się ilość energii uzyskanej z jednego ich grama, to jest to najwydajniejszy z opisanych procesów. Jest to również proces najwolniejszy. Gdyby organizm

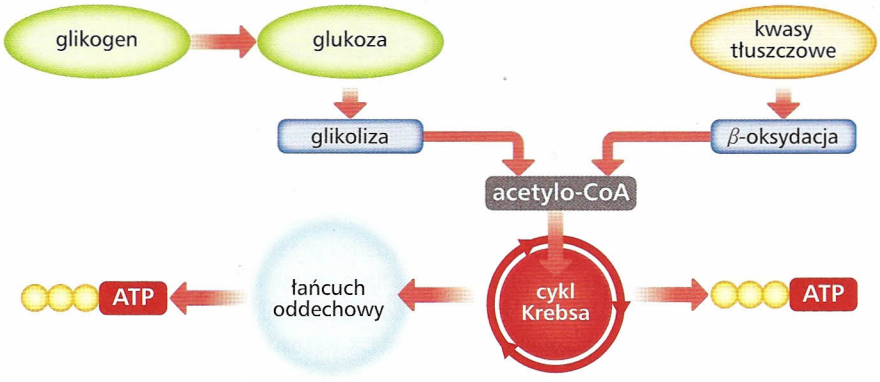
:: Ciekawostka

Badanie poziomu kinazy kreatynowej (ang. *creatine kinase*, CK) w surowicy krwi stanowi bardzo ważny parametr diagnostyczny. Podwyższony poziom CK może wskazywać na uszkodzenie tkanek mięśniowych. Zdarza się to w wypadku przetrenowania (nadmiernego wysiłku fizycznego), kontuzji oraz chorób mięśnia sercowego (jak np. zawał serca). Obniżenie poziomu CK wskazuje na reumatoidalne zapalenie stawów lub marskość wątroby spowodowaną nadużywaniem alkoholu.

Norma poziomu kinazy kreatynowej we krwi wynosi: dla kobiet 40–285, a dla mężczyzn 55–370 (w jednostkach na litr, U/l).



28.2. System mleczanowy



28.3. System tlenowy

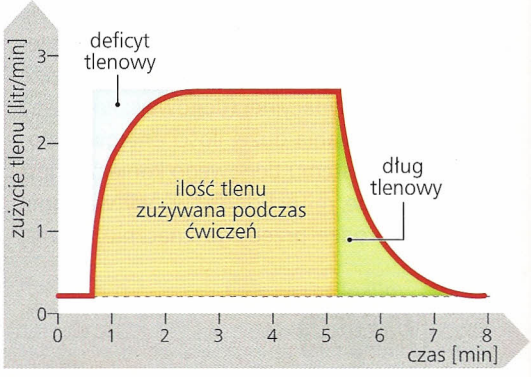
zawodnika polegał wyłącznie na nim, bieg maratoński trwałby około sześciu godzin. Średnia prędkość, jaką osiąga maratończyk (ok. 5,5 m/s), pozwala na przebycie całego dystansu w czasie o ponad połowę krótszym. Jest to możliwe dzięki temu, że zawodnicy w trakcie biegu zużywają prawie jednakowe ilości glikogenu i kwasów tłuszczowych.

Pobór i zużycie tlenu w czasie ćwiczeń fizycznych

W czasie intensywnych ćwiczeń fizycznych zwiększa się znacząco zużycie tlenu w organizmie. Dzieje się to jednak stopniowo, w miarę jak rośnie stopnień adaptacji układu oddechowego do tempa wysiłku fizycznego. Optymalny pobór tlenu zostaje osiągnięty dopiero po pewnym czasie, a różnica pomiędzy ilością tlenu konieczną dla podtrzymania oddychania tlenowego a ilością dostarczoną nosi nazwę **deficytu tlenowego** (28.4.). Nie może on być zbyt duży, ponieważ fosfokreatyna oraz substraty fermentacji mleczanowej szybko się wyczerpują, a ilość energii uzyskana tą drogą jest niewielka. Optymalny pobór tlenu, osiągnięty po pewnym czasie od momentu rozpoczęcia treningu siłowego, pozwala na generowanie energii potrzebnej do maksymalnie wydajnej pracy mięśni.

Po przerwaniu ćwiczeń fizycznych tempo pobierania tlenu nie od razu wraca do poziomu spoczynkowego. Zwiększona szybkość i głębokość oddechów pozwalają na „spłatę" długu tlenowego. Wielkość tego długu jest równa ilości tlenu potrzebnego do uzyskania energii, jaką mięśnie pozyskały dzięki oddychaniu beztlenowemu. Ponieważ tempo oddechów spada wolniej, niż rosło w momencie rozpoczęcia ćwiczeń, dług tlenowy jest zwykle spłacany w nadmiarze. Dzięki temu możliwe staje się wysycenie tlenem mioglobiny w mięśniach oraz ponowne ufosforylowanie kreatyny do fosfokreatyny.

Wytworzenie dodatkowej ilości ATP w procesach tlenowych (już w stanie spoczynku) umożliwia usunięcie szkodliwych produktów ubocznych oddychania beztlenowego odkładających się w mięśniach. Przykładem jest kwas mlekowy, który przenika z mięśni do krwi, a z nią jest transportowany do wątroby. Tu przy użyciu enzymu – **dehydrogenazy mleczanowej** – zo-



28.4. Wykres przedstawiający tworzenie się deficytu oraz długu tlenowego; deficyt tlenowy to różnica między idealnym a rzeczywistym poborem tlenu w danych warunkach, natomiast dodatkowa objętość tlenu, która musi być pobrana po zakończeniu ćwiczeń, to dług tlenowy.

? Wyjaśnij zależność pomiędzy stopniem wytrenowania zawodnika a długością fazy długu tlenowego.

staje ponownie przekształcony w kwas pirogronowy. Następnie w wyniku **glukoneogenezy** pirogronian jest wykorzystywany do resyntezy cząsteczki glukozy, która może zostać przyłączona do obecnego w wątrobie glikogenu lub uwolniona do krwi. Zarówno działanie dehydrogenazy mleczanowej, jak i proces glukoneogenezy wymagają dostarczenia dużych ilości energii w postaci ATP. Również dlatego dług tlenowy jest spłacany w nadmiarze.

Wpływ aktywności fizycznej na układ ruchu

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, ruch i wysiłek fizyczny są nierozerwalnie związane z życiem ludzi i zwierząt. U osobników, którym przez dłuższy czas poważnie ogranicza się możliwość poruszania, zachodzą liczne procesy patologiczne. Należą do nich: zanik mięśni, osłabienie funkcji układu odpornościowego, niedotlenienie tkanek oraz zaburzenia pracy różnych narządów spowodowane nagromadzeniem się w nich zbyt dużej ilości toksycznych produktów przemiany materii. Wszystkie te nieprawidłowości są pośrednio spowodowane niewystarczającą pracą mięśni szkieletowych. Ich ruch ma kluczowe znaczenie dla prawidłowego metabolizmu ustroju, ponieważ każdy kurczący się mięsień wspomaga przepływ krwi, zwłaszcza w naczyniach żylnych.

Praca mięśni i związany z nią ruch są ważne dla utrzymania sprawności dorosłych, ale przede wszystkim – dla prawidłowego rozwoju dzieci i młodzieży. Ćwiczenia fizyczne, a w szczególności trening sportowy, są czynnikiem, który wyzwala szereg pozytywnych zmian we wszystkich układach młodego organizmu. Aby lepiej zaopatrywać pracujące mięśnie w tlen, układ oddechowy i krwionośny przyspieszają swą pracę. Zwiększa się również tempo przemian biochemicznych, prowadzących w efekcie do wytrącenia organizmu ze stanu homeostazy. Dzięki temu w zdrowym organizmie zachodzą zmiany przystosowawcze, mające na celu przywrócenie równowagi wewnętrznej.

Długofalowe zmiany, do których dochodzi w mięśniach i kościach, wpływają na funkcjonowanie całego organizmu. Zależą od intensywności i czasu trwania treningu. W przypadku wysiłku obciążającego mięśnie w 50% zmiany adaptacyjne nie są znaczące. Zachodzą one dopiero przy optymalnym obciążeniu, wynoszącym 80% maksymalnych możliwości (opisano je w tabelach poniżej). Jest to najkorzystniejszy i najzdrowszy dla organizmu typ treningu. Natomiast obciążenia sięgające 90–100% mogą prowadzić do uszkodzeń i degradacji włókien mięśniowych, a w konsekwencji – do znacznego zmniejszenia wydolności mięśni.

:: Ciekawostka

Uboczny produkt metabolizmu beztlenowego – kwas mlekowy – jest ważnym czynnikiem przywabiającym, czyli atraktantem dla samic komarów. Potrafią one wykryć śladowe stężenia tego związku obecne w pocie, podobnie jak zwiększone stężenie dwutlenku węgla w wydychanym powietrzu. Pozwala im to precyzyjnie zlokalizować potencjalne źródło pokarmu (bardzo często jest nim człowiek).





PODSUMOWANIE

- Bezpośrednim źródłem energii potrzebnej do skurczów mięśni jest ATP (adenozynotrifosforan).
- Wyróżnia się trzy mechanizmy pozwalające na wytworzenie ATP w mięśniach: system fosfokreatynowy, system mleczanowy oraz system tlenowy.
- System fosfokreatynowy wykorzystuje fosfokreatynę, która niezależnie od obecności tlenu generuje ATP natychmiast dzięki przeniesieniu reszty fosforanowej na ADP.
- System fosfokreatynowy umożliwia mięśniom jedynie około 10 sekund intensywnego wysiłku.
- Beztlenowy system mleczanowy uruchamia się w drugiej kolejności (gdy wysiłek trwa dłużej niż 10 sekund, ale jest przeplatany momentami odpoczynku, jak w grach zespołowych).
- Przy wysiłku trwającym najdłużej (jak np. bieg maratoński) uruchamiany jest trzeci, najwolniejszy, ale najefektywniejszy system pozyskiwania energii, czyli system tlenowy.
- Deficyt tlenowy pojawiający się w czasie intensywnych ćwiczeń to różnica między ilością tlenu konieczną dla podtrzymania oddychania tlenowego a ilością dostarczoną przez układ oddechowy. Po wysyceniu krwi tlenem (w trakcie treningu) dług tlenowy zostaje spłacony.
- Aktywność fizyczna ma szczególne znaczenie dla prawidłowego wzrostu kości i rozwoju układu mięśniowego osób młodych.

ZADANIA

1. Porównaj systemy fosfokreatynowy, mleczanowy oraz tlenowy pod względem: szybkości uruchamiania, długości trwania oraz wydajności energetycznej.
2. Wyjaśnij pojęcie długu tlenowego.
3. Za pomocą odpowiednich argumentów przekonaj swoich kolegów w klasie o pozytywnym wpływie ruchu na stan mięśni oraz układu kostnego.
4. Wyjaśnij, jakie znaczenie ma wytrącenie organizmu ze stanu homeostazy w czasie treningu siłowego.

BIBLIOGRAFIA

- Grimshaw P., Lees A., Flower N., Burden A., *Biomechanika sportu*. Krótkie wykłady, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010.

29. Składniki pokarmowe – ich rola i źródła

Odżywianie to proces, który polega na pobieraniu przez organizm pokarmu oraz na jego trawieniu i przyswajaniu. Celem tego procesu jest dostarczenie ustrojowi niezbędnych do życia składników odżywczych. Podstawowymi składnikami pokarmowymi są **tłuszcze**, **białka** oraz **węglowodany**. Poza nimi szczególne znaczenie dla organizmu mają **witaminy**, **woda** i **składniki mineralne**. Nie mniej ważny jest **błonnik**, który wpływa znacząco na mechanikę procesu trawienia, mimo że nie jest trawiony. Dopiero wszystkie te składniki w odpowiednich proporcjach składają się na zdrowy i pożywny pokarm.

Tłuszcze

Tłuszcze są doskonałym surowcem energetycznym, czego dowodzi fakt, że z jednego grama tłuszczu organizm potrafi w warunkach tlenowych uzyskać aż 38 kilodżuli energii. Związki te wchodzą w skład podskórnej tłuszczowej tkanki łącznej oraz wielu narządów wewnętrznych, odgrywają także kluczową rolę budulcową, współtworząc błony komórkowe. Zmagazynowany w organizmie tłuszcz chroni przed stratami ciepła, dzięki czemu umożliwia przetrwanie w trudnych warunkach. Ponieważ w procesie oddychania tlenowego ostatecznym produktem spalania tłuszczów poza CO_2 jest woda, są one również doskonałym jej magazynem (ze 100 g tkanki tłuszczowej powstaje aż 107 g wody!). Oprócz tego odpowiednia ilość tłuszczów w diecie pozwala organizmowi na prowadzenie oszczędnej gospodarki białkowej i witaminowej.

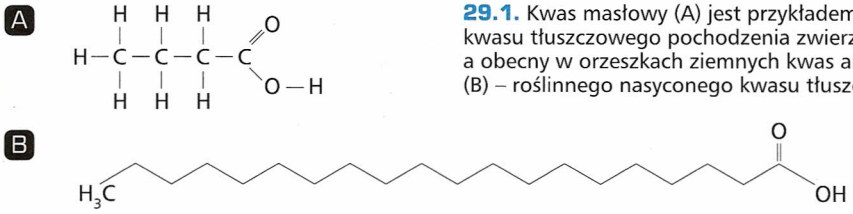
Tłuszcze występują we wszystkich pokarmach poza większością warzyw i owoców. Najczęściej spożywanymi ich formami są **kwasy tłuszczowe** nasycone oraz **kwasy tłuszczowe nienasycone**. Wśród tych ostatnich wyróżnia się kwasy tłuszczowe jednonienasycone oraz wielonienasycone (głównie omega-3 i omega-6). Badania wykazują, że należy ograniczać spożycie nasyconych kwasów tłuszczowych na rzecz ich form nienasyconych. Ważne jest również zachowanie odpowiednich proporcji pomiędzy ilością kwasów omega-3 a omega-6 (ich stosunek powinien wynosić od 1:3 do 1:5). Najczęściej jednak stosunek omega-3 do omega-6 w diecie jest zachwiany (wynosi od 1:15 do 1:20), co może być szkodliwe dla zdrowia. Aby przywrócić prawidłowe proporcje między obomą typami kwasów, zaleca się wprowadzanie do diety produktów zawierających przewagę kwasów omega-3. Należą do nich między innymi tłuste ryby morskie, a także olej uzyskiwany z wątroby dorsza (tran).

Kwasy tłuszczowe nasycone

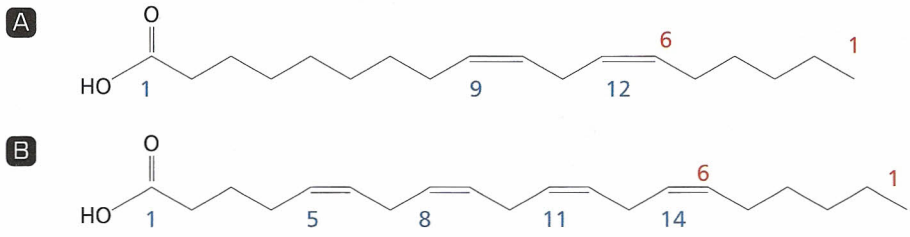
Do grupy tej należą tłuszcze, których cząsteczki nie zawierają wiązań podwójnych (są one głównie pochodzenia zwierzęcego, jak masło, słonina). Przykładami mogą być kwas masłowy (czterowęglowy) oraz kwas arachidowy (dwudziestowęglowy) **(29.1.)**.

Kwasy tłuszczowe nienasycone

To kwasy tłuszczowe zawierające co najmniej jedno wiązanie podwójne (należą do nich oleje roślinne). Są one składnikiem błon komórkowych i prowadzą do obniżenia poziomu cholesterolu we krwi. Te z nich, które muszą być dostarczane wraz z pokarmem, nazywa się egzogennymi nienasyconymi kwasami tłuszczowymi. Ich nie-



29.1. Kwas masłowy (A) jest przykładem nasyconego kwasu tłuszczowego pochodzenia zwierzęcego, a obecny w orzeszkach ziemnych kwas arachidowy (B) – roślinnego nasyconego kwasu tłuszczowego.



29.2. Przykłady nienasyconych kwasów tłuszczowych: kwas linolowy (A) oraz kwas arachidonowy (B)

dobór może mieć poważne konsekwencje dla organizmu. Typowymi objawami niewystarczającej ilości nienasyconych kwasów tłuszczowych są: wypadanie włosów, zmiany skórne, spadek masy ciała i zahamowanie wzrostu, obniżenie siły skurczu mięśnia sercowego i, co za tym idzie, upośledzenie funkcji układu krwionośnego.

Kwasy tłuszczowe omega-3

Są to nienasycone kwasy tłuszczowe, w których ostatnie wiązanie podwójne położone jest przy trzecim od końca atomie węgla. Przykładami są: kwas α-linolenowy, kwas dokozaheksaenowy oraz kwas eikozapentaenowy. Liczne badania powierdziły działanie przeciwnowotworowe i przeciwzakrzepowe kwasów omega-3, a także ich wpływ na obniżenie poziomu trójglicerydów we krwi oraz zmniejszenie ryzyka zawałów i arytmii serca.

Kwasy tłuszczowe omega-6

Są to nienasycone kwasy tłuszczowe, w których ostatnie wiązanie podwójne znajduje się przy szóstym od końca atomie węgla. Zalicza się je do egzogennych kwasów tłuszczowych, zatem muszą one być przyjmowane wraz z pożywieniem. Należą do nich: kwas linolowy oraz kwas arachidonowy **(29.2.)**. Kwasy omega-6 są prekursorami hormonów prozapalnych (tzw. prostaglandyn), co może prowadzić do zaostrzenia istniejących stanów zapalnych i rozwoju reakcji alergicznych. Mimo że kwasy te obniżają poziom cholesterolu we krwi, to w nadmiarze mogą prowadzić do zachwiania równowagi immunologicznej, a nawet przyspieszać podziały komórek nowotworowych. Pod tym względem kwasy omega-3 wykazują działanie antagonistyczne wobec kwasów omega-6.

Białka

Białka występują powszechnie we wszystkich organizmach żywych; budują narządy i tkanki, wchodzą w skład każdej komórki. Tworzą je przede wszystkim: **węgiel**, **wodór**, **tlen**, **azot** oraz bardzo często siarka i fosfor. Białka pełnią wiele istotnych funkcji:

- służą do budowy i odbudowy tkanek
- są głównym składnikiem wielu związków biologicznie czynnych (jak np. enzymy, hormony)
- budują przeciwciała
- utrzymują właściwy odczyn pH płynów ustrojowych
- pełnią funkcje transportowe (witamin, soli mineralnych, hormonów, pierwiastków)
- odpowiadają za regulację ciśnienia osmotycznego.

Normy dotyczące spożycia białek		
Grupa wiekowa		Norma spożycia białka (g)
dzieci	1–9 lat	45–65
dziewczęta	10–18 lat	75–85
chłopcy	10–18 lat	85–100
kobiety	19–60 lat	70–90
	>60 lat	65–70
	ciężarne karmiące	95–110
mężczyźni	19–60 lat	75–100
	> 60 lat	65–70

Białka są podstawowym składnikiem odżywczym, bez którego nie może funkcjonować żaden żywy organizm (w procesie trawienia zostają rozłożone na aminokwasy). Ilość białka w diecie zależy od zwyczajów żywieniowych, ale nie powinna przekraczać 15–20%. Najlepiej przyswajalne białko znajduje się w produktach pochodzenia zwierzęcego, które dodatkowo dostarczają najwięcej tego składnika pokarmowego (ok. 40–60%). Można wśród nich wymienić: mięso, wędliny, drób, ryby, mleko i jego przetwory, jaja. Resztę stanowią białka pochodzenia roślinnego: produkty zbożowe, ziemniaki, warzywa oraz owoce.

Aminokwasy budujące białka dostarczane z pokarmem dzielą się na: wytwarzane w ustroju **aminokwasy endogenne** oraz **aminokwasy egzogenne**, niepodlegające syntezie, które należy przyjmować w pokarmie. Do aminokwasów egzogennych zaliczamy: fenyloalaninę, izoleucynę, leucynę, lizynę, metioninę, treoninę, tryptofan oraz walinę. Poza nimi trzy aminokwasy uważa się za względnie egzogenne (argininę, histydynę i tyrozynę).

Mogą one być wytwarzane w organizmie pod warunkiem dostarczenia egzogennego prekursora, z którego powstają. Białka zwierzęce nazywa się nie tylko wysoko przyswajalnymi, ale także pełnowartościowymi, gdyż zawierają wszystkie potrzebne organizmowi aminokwasy. Białka pochodzenia roślinnego są określane jako niepełnowartościowe, gdyż zwykle brak jest w nich wielu aminokwasów egzogennych.

Dlatego też wegetarianie, żeby uniknąć niedoborów aminokwasów egzogennych, muszą dbać, aby w ich diecie znalazły się pokarmy bogate w wysokogatunkowe białko roślinne (jak np. soja, mąka pszenna oraz orzechy).

Zawartość białek w wybranych produktach spożywczych

Produkt zawierający białko zwierzęce	Ilość białka w 100 g	Produkt zawierający białko roślinne	Ilość białka w 100 g
ser edamski tłusty	27,9	soja	34,9
mleko w proszku pełne	27,0	groch	23,8
ser twarogowy chudy	21,2	fasola	21,4
wołowina (pieczeń)	20,9	kasza gryczana	12,6
kiełbasa krakowska	20,1	kasza jęczmienna	8,8
cielęcina	19,9	chleb żytni	3,2
wątroba	19,7	szpinak	2,6
kurczak	18,6	kalafior	2,4
jaja	12,5	kapusta	1,7
kaszanka	9,1	ziemniaki	1,7
mleko krowie 2% tł.	3,0	ogórki	0,7

Węglowodany

Węglowodany, podobnie jak tłuszcze, stanowią surowiec energetyczny (w wyniku trawienia 1 g glukozy powstaje 17 kJ energii). W organizmie człowieka tę funkcję pełnią przede wszystkim skrobia i glukoza. Węglowodany występują niemal we wszystkich pokarmach naturalnych (owocach, warzywach) oraz produktach zbożowych. Bogatymi ich źródłami są: pszenica, kukurydza, ryż, ziemniaki oraz produkty przetworzone, jak chleb czy makaron.

Cukier w czystej postaci kojarzy się zazwyczaj z sacharozą otrzymywaną z buraków cukrowych. Według dietetyków biały cukier poddany rafinacji jest pozbawiony wszystkich wartości odżywczych. Dlatego też należy dbać o to, aby w codziennej diecie znalazły się jak największe ilości cukru w postaci naturalnej (zawartego w warzywach, owocach, mleku, produktach zbożowych oraz mięsie).

Błonnik

Jest to kluczowy element prawidłowo zbilansowanej diety. Nie tylko pomaga w oczyszczaniu przewodu pokarmowego z produktów przemiany materii, lecz także zwiększa objętość spożywanego pokarmu. Opóźnia to jego wędrówkę przez jelita i powoduje, że organizm ma więcej czasu, aby wchłonąć wszystkie wartościowe składniki. Głównymi składnikami błonnika są **celuloza**, **ligniny** oraz **pektyny**, które występują tylko w tkance roślinnej i są oporne na działanie enzymów trawiennych działających w przewodzie pokarmowym człowieka. Duże ilości błonnika znajdują się w mące z pełnego przemiału (razowej); zawierają go również owoce i warzywa (jak np. rośliny strączkowe czy szpinak). Ponieważ błonnik nie rozpuszcza się w wodzie i nie jest trawiony, ma duży wpływ na funkcjonowanie przewodu pokarmowego człowieka:

- pobudza funkcje żucia i wydzielania śliny
- buforuje i wiąże nadmiar kwasu solnego w żołądku
- wpływa na wydzielanie tkankowego hormonu przewodu pokarmowego (gastryny)
- zwiększa objętość treści pokarmowej
- pobudza wydzielanie soków trawiennych
- poprawia ukrwienie jelit
- szybko wywołuje uczucie sytości.

Dieta bogata w **błonnik** ułatwia kontrolowanie masy ciała, zapobiega też wielu chorobom: otyłości, rakowi okrężnicy, a pośrednio – chorobom serca. Dobowe zapotrzebowanie osoby dorosłej na błonnik wynosi około 25 gramów.

Zawartość węglowodanów i błonnika w pożywieniu

Produkt	Sacharoza, laktoza i skrobia [g/100 g produktu]	Błonnik [g/100 g produktu]
brzoskwinia	4,6	1,5
gruszka	1,0	2,1
jabłko	3,4	1,8
śliwki	5,0	2,3
orzechy laskowe	4,6	9,8
cebula	2,3	1,7
fasola biała	48,5	15,7
groszek zielony	11,3	6,0
ziemniaki	17,6	1,2
pieczarka suszona	9,0	26,5
płatki kukurydziane	80,2	11,0
płatki owsiane	61,4	6,9
ryż	78,4	2,4
otręby pszenne	15,7	42,4
chleb żytni razowy	41,5	6,2
chleb żytni jasny	38,6	2,8
bułki pszenne	46,2	1,9

Witaminy

Witaminy to substancje niezbędne dla organizmu człowieka, które muszą być dostarczane razem z pokarmem. Dieta składająca się z odpowiedniej ilości białka, cukrów i tłuszczów, ale pozbawiona witamin i soli mineralnych mogłaby doprowadzić do śmierci. Rola witamin jest szczególnie widoczna podczas reakcji chemicznych zachodzących w organizmie.

Najważniejsze witaminy w diecie człowieka

Nazwa witaminy	Źródła pokarmowe	Znaczenie
witamina A (retinol)	wątroba, tran, tłuste sery, jaja, mleko, masło, pomidory, marchew, morele, papaja, dynia, grejfrut (organizm jest w stanie wyprodukować witaminę A z karotenoidów – żółtych pigmentów zawartych w warzywach i owocach)	Jest niezbędna dla właściwego funkcjonowania siatkówki oka; jej niedobór powoduje kłopoty z widzeniem o zmierzchu (tzw. kurzą ślepotę), choroby skóry i błon śluzowych, a u dzieci – zahamowanie wzrostu.

witamina B_1 (tiamina)	wątroba, nerki, drożdże, kiełki pszenicy, rodzynki, jaja, fasola, groch, kalafior, ziemniaki, orzechy, pieczywo razowe, kasze, otręby i mleko (oczyszczone ziarno pszenicy i ryżu zawiera 30% tiaminy występującej w ziarnie nieoczyszczonym)	Jest niezbędna podczas utleniania glukozy w organizmie, wspomaga proces wzrostu, prawidłową pracę serca, funkcjonowanie nerwów i mięśni; jej niedobór prowadzi do choroby beri-beri, której towarzyszy zanik mięśni, zaburzenia psychiczne, utrata apetytu i obrzmienie kończyn.
witamina B_2 (ryboflawina)	kiełki pszenicy, wątroba, drób, nerki, ryby, mleko, produkty mleczne, brokuły, szpinak, sałata, drożdże, marchew, jaja, pieczywo pełnoziarniste	Jest niezbędna dla prawidłowego przebiegu procesów przemiany materii, jest prekursorem FAD, który bierze udział w cyklu Krebsa; jej niedobór powoduje pogorszenie ostrości widzenia, pęknięcia błon śluzowych, wywołuje choroby układu nerwowego oraz anemię.
witamina B_3 (witamina PP, niacyna, kwas nikotynowy)	wyciągi z drożdży, wątroba, mięso, drób, ryby, produkty pełnoziarniste, warzywa zielone, orzechy (niacynę produkują też bakterie znajdujące się w jelitach)	Jest niezbędna do wzrostu organizmu, odpowiada za prawidłową kondycję skóry i funkcjonowanie układu nerwowego, reguluje poziom cholesterolu we krwi oraz uczestniczy w utlenianiu węglowodanów, aminokwasów i kwasów tłuszczowych; jej niedobór powoduje pelagrę (rumień lombardzki), charakteryzującą się zapaleniem skóry i ust, biegunką oraz zaburzeniami psychicznymi.
witamina B_5 (kwas pantotenowy)	watroba, otręby pszenne, kiełki pszenicy, ryby, orzechy włoskie, mleko, żółtko jaja, awokado	Wchodzi w skład koenzymu A, łagodzi stany zapalne, bierze udział w produkcji hormonów kory nadnerczy, poprawia pigmentację i wzrost włosów. Jej niedobór powoduje bóle i sztywność stawów, przedwczesną siwiznę, pęknięcia skóry, skurcze w ramionach i nogach, uczucie odrętwienia i rozdrażnienia.
witamina B_6 (pirydoksyna)	ziarna soi, kiełki pszenicy, wątroba, drożdże, orzechy włoskie, banany, awokado, szpinak, ryby, mąka pełnoziarnista, drób	Jest koenzymem dekarboksylazy i transaminaz aminokwasów, jako koenzym fosforylazy wpływa na glikogenezę i glikogenolizę w mięśniach, niezbędna do produkcji hemoglobiny. Jej niedobór powoduje bóle i sztywność stawów, zmniejszenie odporności, stany zapalne skóry, uczucie zmęczenia i apatii, zaburzenia pamięci.
witamina B_7 (witamina H, biotyna)	drożdże, pomidory, ziarna soi, otręby, orzechy włoskie, wątroba, żółtko jaja, sardynki, groch, czekolada, migdały	Wpływa na wygląd włosów, skóry i paznokci, hamuje aktywność gruczołów łojowych. Jej niedobór powoduje łojotok, podwyższenie poziomu cholesterolu i barwników żółciowych we krwi, bóle mięśni, osłabienie i apatię.
witamina B_9 (kwas foliowy, witamina B_{11})	warzywa zielone, marchew, dynia, drożdże, mleko, żółtko, wątroba, bób, kukurydza, awokado, papaja	Odpowiada za prawidłowy rozwój układu nerwowego rozwijającego się płodu, produkcję endorfin i syntezę kwasów nukleinowych, reakcje odpornościowe, Niedobór tej witaminy powoduje problemy z pamięcią, bezsenność, uczucie zmęczenia i rozdrażnienia, zaburzenia trawienia i wchłaniania, może prowadzić do anemii.
witamina B_{12} (kobalamina)	surowa wątroba, mięso, ryby, mleko, żółtko jaja, kiełki	Jest niezbędna do produkcji czerwonych krwinek, poprawia pamięć i koncentrację. Jej niedobór skutkuje zahamowaniem produkcji krwinek czerwonych, co może prowadzić do anemii oraz zaburzenia żołądkowo-jelitowe (brak apetytu).
witamina C (kwas askorbinowy)	owoce cytrusowe, jagody, świeże warzywa, mleko (duże ilości witaminy C są tracone podczas gotowania potraw)	Niezbędna dla zachowania prawidłowego stanu kości, zębów, naczyń krwionośnych, działa jako przeciwutleniacz (wychwytuje wolne rodniki), przez co zapobiega chorobom nowotworowym; jej niedobór prowadzi do szkorbutu, który charakteryzuje się gąbczastymi, krwawiącymi dziąsłami.
witamina D_3 (cholekalcyferol)	tran z dorsza, śmietana, żółtko jaja i wątroba (powstaje także z prekursora witaminy D_3 podczas wystawiania skóry na promieniowanie słoneczne)	Jest związana ze wzrostem kości i zębów, działa tylko z odpowiednią ilością wapnia i fosforu; jej niedobór u dzieci prowadzi do nieprawidłowej mineralizacji kości, czyli do krzywicy.
witamina E (tokoferol)	oleje sojowy i słonecznikowy, nasiona soi, wątroba, masło, żółtko jaja, owies	Potrzebna do reprodukcji i funkcjonowania komórek nerwowych i mięśniowych, bierze udział w przemianie materii jako związek antyoksydacyjny (usuwający wolne rodniki), działa przeciwnowotworowo i przyspiesza gojenie się ran; jej niedobór może powodować bezpłodność, pogorszenie wzroku oraz zwiększone ryzyko chorób sercowo-naczyniowych.
witamina K (filochinon)	zielone liście warzyw, wątroba wieprzowa, jaja, mleko (produkują ją także bakterie jelitowe)	Jest podstawowym czynnikiem krzepnięcia krwi; u dorosłych rzadko występuje jej niedobór, ale w jelitach noworodków nie ma bakterii produkujących tę witaminę, co może powodować skazę krwotoczną.

Składniki mineralne

To grupa 46 związków warunkujących prawidłowy rozwój organizmu, z czego aż 30 uważa się za niezbędne do życia. **Składniki mineralne** stanowią nawet 4% masy ciała i, podobnie jak witaminy, muszą być dostarczane wraz z pożywieniem. Ze względu na zapotrzebowanie organizmu składniki mineralne dzieli się na dwie grupy: makroelementy i mikroelementy. Do makroelementów zaliczamy: wapń, chlor, magnez, fosfor, potas, sód. Do mikrolementów natomiast należą: żelazo, cynk, miedź, mangan, molibden, jod, fluor, chrom oraz selen. Znaczenie makro- i mikroelementów przedstawiono w pierwszej części podręcznika (S. Grabowski, A. Kurek, *Biologia. Zakres rozszerzony*, OPERON, Gdynia 2012, s. 9–10).

W organizmie człowieka składniki mineralne pełnią wiele istotnych funkcji:

- wchodzą w skład innych związków (m.in.: hemoglobiny, mioglobiny, witaminy B_{12} oraz licznych enzymów)
- są materiałem budulcowym dla kości, zębów, włosów oraz skóry
- utrzymują równowagę kwasowo-zasadową ustroju
- odpowiadają za pobudliwość nerwowo-mięśniową.

Składniki mineralne występują w warzywach, owocach, produktach zbożowych i pochodzenia zwierzęcego. Zapotrzebowanie na nie znacznie rośnie w czasie ciąży, w okresie laktacji (karmienia piersią), stanach chorobowych oraz w trakcie intensywnego wzrostu (u dzieci). W takiej sytuacji należy stosować odpowiednią suplementację, gdyż ilość składników mineralnych dostarczanych z pokarmem nie zawsze jest wystarczająca.

PODSUMOWANIE



- Głównymi składnikami pokarmowymi są tłuszcze, białka i węglowodany. Poza nimi znaczącą rolę odgrywają: błonnik, witaminy, woda oraz makro- i mikroelementy.
- Tłuszcze są najlepszym źródłem energii dla organizmu (z 1 g tłuszczu powstaje aż 38 kJ energii).
- Wyróżnia się kwasy tłuszczowe nasycone i nienasycone (wśród nich kwasy omega-3 i omega-6).
- Białka pełnią głównie funkcje budulcowe, choć w stanach niedożywienia mogą służyć jako materiał energetyczny.
- Węglowodany są najbardziej dostępnym źródłem energii dla organizmu.
- Ważnym składnikiem każdej diety powinien być błonnik, czyli nierozpuszczalne i niepoddające się procesowi trawienia elementy komórek roślinnych (celuloza i ligniny).
- Witaminy i składniki mineralne odgrywają kluczową rolę w funkcjonowaniu organizmu, dlatego muszą być dostarczane wraz z pokarmem.

ZADANIA



1. Porównaj rolę kwasów omega-3 i omega-6.
2. Scharakteryzuj rolę białek w diecie człowieka.
3. Wyjaśnij, dlaczego jedzenie pokarmów zawierających błonnik jest szczególnie ważne dla osób chcących utrzymać prawidłową masę ciała.
4. Omów rolę witamin i składników mineralnych w organizmie człowieka.

BIBLIOGRAFIA



- Gawęcki J., Hryniewiecki L. (red.), *Żywienie człowieka. Podstawy nauki o żywieniu*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- Szczygieł A., *Podstawy fizjologii żywienia*, PZWL, Warszawa 1975.
- Ziemlański Ś. (red.), *Normy żywienia człowieka – fizjologiczne podstawy*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, Warszawa 2001.

W INTERNECIE



- http://www.dietetyka.com.pl/

30. Budowa układu pokarmowego

Organizm człowieka, aby istnieć i funkcjonować, musi pobierać pokarm z otoczenia. Są to substancje niezbędne do budowy nowych komórek i tkanek, syntezy enzymów (biokatalizatorów) oraz służące jako źródło energii podczas procesów metabolicznych. W niezmienionej postaci przyswajane są jedynie woda, cukry proste oraz sole mineralne. Pozostałe składniki pokarmowe muszą najpierw zostać poddane procesowi **trawienia**. Polega ono na mechanicznym i chemicznym przekształceniu pokarmu, czyli jego rozdrobnieniu, rozkładzie na związki prostsze oraz przyswojeniu. Poszczególne etapy tego procesu zachodzą na wyspecjalizowanych odcinkach przewodu pokarmowego.

Odcinki przewodu pokarmowego i ich rola

W skład układu pokarmowego wchodzą **przewód pokarmowy** oraz **gruczoły trawienne**: **wątroba**, **trzustka** i **ślinianki**. Przewód pokarmowy, w którym przemieszcza się pokarm i zachodzą kolejne etapy procesu trawienia, obejmuje: **jamę ustną**, **gardło**, **przełyk**, **żołądek**, **jelito cienkie**, **jelito grube** i **odbytnicę** **(30.1.)**.

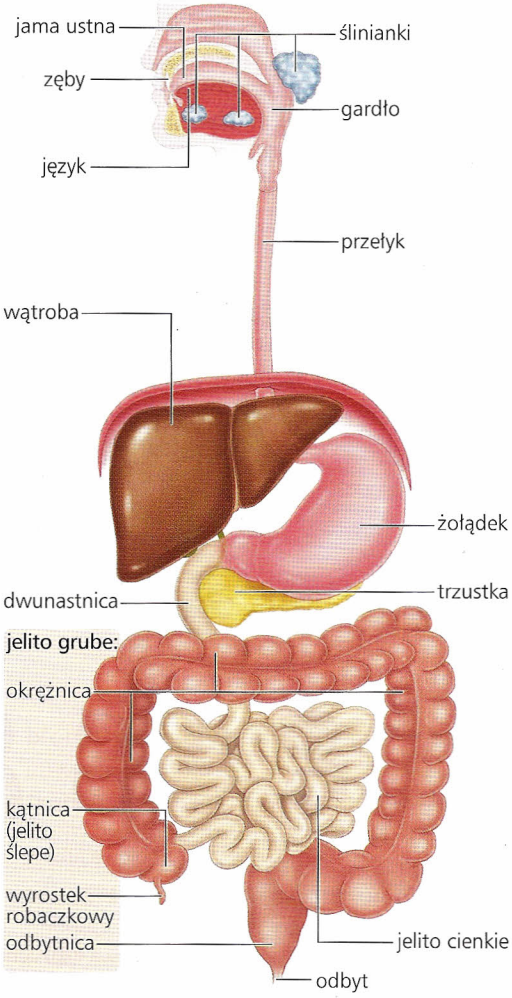
Jama ustna

Jama ustna to początkowy odcinek przewodu pokarmowego, w całości wysłany bogato unaczynioną śluzówką, która zawiera liczne gruczoły śluzowe i ślinowe. To tutaj zachodzi pierwszy mechaniczny etap trawienia pokarmu. Zostaje on rozdrobniony, przeżuty, zlepiony śliną i pokryty śluzem. Ułatwia to jego połknięcie.

Zęby

Zęby są twardymi kościopodobnymi tworami, osadzonymi w zębodołach szczęki i żuchwy. Ich zadania to gryzienie, miażdżenie i rozdrabnianie pokarmu. U człowieka występują dwa pokolenia zębów: zęby mleczne i zęby stałe. Jest to tak zwane zjawisko difilodontyzmu.

Patrząc na ząb z boku, można w nim wyróżnić: położoną powyżej dziąsła **koronę**, przykrytą dziąsłem (ale wystającą ponad zębodół) **szyjkę** oraz tkwiący w zębodole **korzeń**. Powierzchnia korony zęba jest mlecznobiała, bardzo twarda i stanowi właściwy element mechaniczny. Twardość i zabarwienie korona zawdzięcza warstwie **szkliwa**. Na przekroju zęba widać, że wnętrze korony (tzw. komora zęba) jest dość obszerne. Przechodzi ono w kanał (lub kanały) korzenia, na których zakończeniu znajduje się otwór szczytowy zęba. Zarówno komorę, jak i kanały korzenia wypełnia **miazga zębowa**, a otacza je **zębina** (bardzo podobna do tkanki kostnej) **(30.2.)**.



30.1. Budowa układu pokarmowego

Uzębienie człowieka jest zróżnicowane i obejmuje następujące rodzaje zębów:

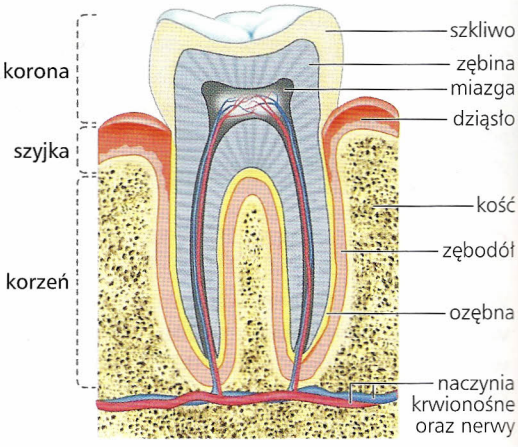
- **siekacze**, których korona jest silnie spłaszczona, przez co przypomina dłuto;
- **kły**, czyli najdłuższe zęby, mające koronę stożkowatego kształtu pozbawioną krawędzi siecznej (zamiast niej występuje punkt sieczny);
- **przedtrzonowce** o płaskiej powierzchni żującej i pojedynczym, spłaszczonym korzeniu;
- **trzonowce**, mające powierzchnię żującą większą niż przedtrzonowce, a także dwa korzenie lub więcej.

W skład uzębienia mlecznego wchodzi 20 zębów (po 10 w każdym łuku zębowym): dwa siekacze, jeden kieł i dwa trzonowe w każdej połówce obu łuków. W uzębieniu stałym występują 32 zęby (po 16 w każdym łuku zębowym): dwa siekacze, jeden kieł, dwa przedtrzonowce i trzy trzonowce w każdej połówce obu łuków **(30.3.)**. Trzeci ząb trzonowy (tzw. ósemki) pojawiają się między 17. a 30. rokiem życia, a u wielu osób nie wyrzynają się wcale. Zęby te są bardziej podatne na próchnicę, co często kwalifikuje je do usunięcia.

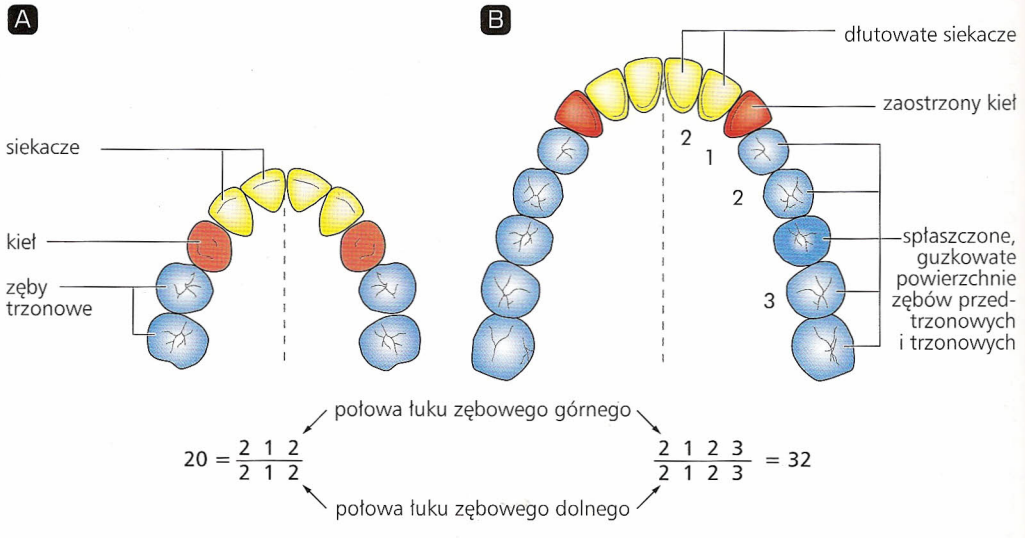
Ślinianki

Do jamy ustnej uchodzą trzy pary **gruczołów ślinowych** (**ślinianek**): przyuszne (największe), podżuchwowe oraz podjęzykowe. Wydzielają one ślinę, której podstawową funkcją jest udział w formowaniu kęsa pokarmowego. Dzięki zawartym w ślinie białkom pokarm zostaje zlepiony, staje się śliski i może zostać łatwo połknięty. Z kolei **amylaza ślinowa** rozpoczyna proces trawienia skrobi zawartej w pokarmie. Ślina umożliwia proces remineralizacji szkliwa oraz przyczynia się do eliminacji drobnoustrojów z jamy ustnej. Odgrywa również istotną rolę w odbieraniu wrażeń smakowych, rozpuszcza bowiem składniki pokarmowe, dzięki czemu mogą one zostać odebrane przez komórki kubków smakowych.

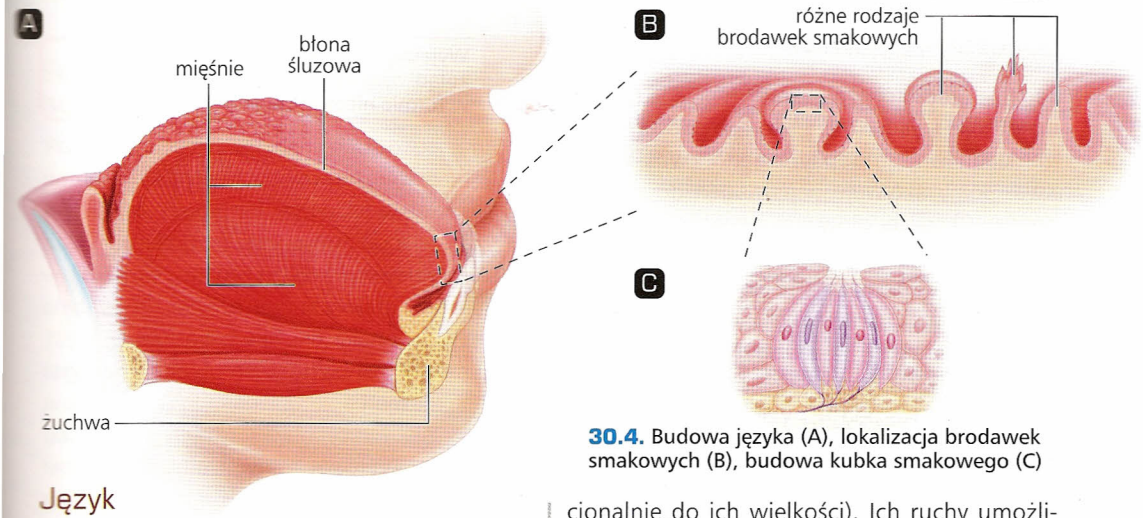
? Który szczegół budowy pozwala nazywać zęby tworami kościopodobnymi?



30.2. Budowa zęba trzonowego człowieka



30.3. Schematy uzębienia mlecznego (A) i stałego (B)



30.4. Budowa języka (A), lokalizacja brodawek smakowych (B), budowa kubka smakowego (C)

Język

Język to gruby wał mięśniowy, pokryty błoną śluzową i przymocowany do dna jamy ustnej (30.4.). W błonie śluzowej obecne są liczne brodawki językowe, sprawiające, że powierzchnia języka jest szorstka. W ich obrębie znajdują się kubki smakowe, które są głównym elementem narządu smaku. Mięśnie tworzące język należą do najsilniejszych w ciele człowieka (proporcjonalnie do ich wielkości). Ich ruchy umożliwiają mieszanie treści pokarmowej w trakcie jej obróbki w jamie ustnej. Dzięki temu szybko i sprawnie tworzony jest kęs pokarmu, który następnie może być bezproblemowo przełknięty. Ruchy języka mają też kluczowe znaczenie dla wykształcenia zdolności mowy (poprzez modulację przepływu strumienia powietrza napływającego z tchawicy).

Gardło

Gardło to lejkowatego kształtu odcinek przewodu pokarmowego położony za jamą ustną. Krzyżują się w nim drogi pokarmowe (w dolnej części przechodzi w przełyk) i oddechowe (prowadzące do krtani). Przez nozdrza tylne gardło łączy się również z jamą nosową, a poprzez trąbki Eustachiusza – z jamami ucha środkowego. Gardło odgrywa kluczową rolę w odruchu połykania, umożliwiającym przemieszczenie kęsa pokarmowego z jamy ustnej do przełyku.

Przełyk

Przełyk jest najwęższym odcinkiem przewodu pokarmowego, który łączy gardło z żołądkiem. Dzięki skoordynowanym i rytmicznym skurczom mięśni przełyku pokarm przesuwa się w kierunku żołądka.

Żołądek

Żołądek to workowaty narząd, w którym odbywa się mechaniczna obróbka pokarmu oraz rozpoczyna się proces enzymatycznego trawienia białek i lipidów. Dzięki temu pokarm zmienia się w płynną miazgę, która może następnie zostać przesunięta w kierunku dwunastnicy (30.5.).

Kształt żołądka jest inny u każdego człowieka, a ponadto ulega ciągłym zmianom. Ściana żołądka składa się z czterech warstw:

- **błona surowicza**, będąca częścią otrzewnej pokrywającej cały żołądek;
- **błona mięśniowa** zbudowana z pęczków mięśni gładkich;
- **tkanka podśluzowa**, będąca grubą warstwą tkanki łącznej, w której przebiegają liczne naczynia krwionośne i nerwy;
- **błona śluzowa**, stanowiąca grubą, silnie pofałdowaną wewnętrzną warstwę żołądka, zbudowana z nabłonka jednowarstwowego walcowatego, w którym widoczne są liczne ujścia gruczołów żołądkowych.

Gruczoły żołądkowe

Zadanie gruczołów żołądkowych polega na produkcji soku żołądkowego, którego podstawowymi składnikami są **pepsynogen** i **kwas solny**. Kwas solny aktywuje pepsynogen do postaci pepsyny, będącej głównym enzymem proteolitycznym (trawiącym białka) w żołądku. Gruczoły żołądkowe odpowiadają również za produkcję śluzu pokrywającego powierzchnię błony śluzowej żołądka. Jego warstwa nie jest gruba (nie przekracza 1 mm), ale skutecznie chroni błonę śluzową i leżące pod nią warstwy przed samostrawieniem przez enzymy żołądkowe.

Procesy trawienne w żołądku

Do najważniejszych funkcji żołądka należą magazynowanie i trawienie znajdującego się w nim pokarmu. Dzięki ruchom perystaltycznym żołądka znajdujący się w nim pokarm zostaje dokładnie wymieszany z sokiem żołądkowym i poddany działaniu enzymów w nim obecnych. Gdy zawartość żołądka uzyska odpowiednią konsystencję, pewna jej porcja zostaje przepchnięta zstępującą falą skurczów w kierunku dwunastnicy. Rozpoczęty w jamie ustnej proces trawienia skrobi zostaje w żołądku zatrzymany w wyniku denaturacji amylazy ślinowej.

Skład soku żołądkowego

Sok żołądkowy jest płynem o kwaśnym odczynie (pH od 1,5 do 2). Jego ilość wydzielana w ciągu doby wynosi od 1,5 do 2,5 litra i zależy od rodzaju oraz objętości spożywanego pokarmu, a także częstości, z jaką jest przyjmowany. W skład soku żołądkowego wchodzą: kwas solny (nadający mu niskie pH), sole mineralne (NaCl i KCl), woda oraz enzymy pełniące główne funkcje trawienne – pepsyna, podpuszczka i lipaza żołądkowa.

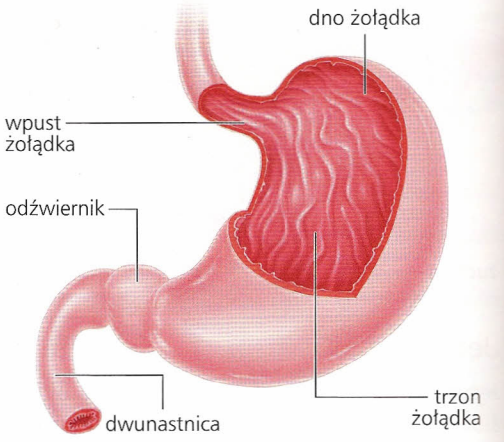
Pepsyna to enzym odpowiedzialny za proces niespecyficznego trawienia białek. Wydzielana jest w postaci nieczynnej i dopiero po dotarciu do światła żołądka przekształca się pod wpływem kwasu solnego w aktywną pepsynę. W takiej postaci prowadzi trawienie białek zawartych w pokarmie, w wyniku czego powstają krótkie polipeptydy i oligopeptydy. Ich dalszy rozkład zachodzi za pomocą enzymów trzustkowych.

Podpuszczka to enzym działający bardzo specyficznie: rozkłada i ścina rozpuszczone w mleku białko – kazeinę. Dzięki temu zostaje ona szybko i całkowicie strawiona przez żołądkową pepsynę i jelitową trypsynę. Podpuszczka wytwarzana jest w dużej ilości u niemowląt karmionych pokarmem mlecznym. Dzieje się tak tylko do około trzeciego roku życia – później ilości podpuszczki wydzielane do soku żołądkowego są śladowe.

Lipaza żołądkowa działa wyłącznie na tłuszcze docierające do żołądka w postaci zemulgowanej (np. obecne w mleku, jogurtach). W soku żołądkowym jest jej niewiele.

Kwas solny nie jest enzymem, odgrywa jednak kluczową rolę w funkcjonowaniu żołądka, a pośrednio – całego przewodu pokarmowego. Odpowiada za aktywację pepsynogenu do pepsyny, tworzy kwaśne środowisko pracy tego enzymu, powoduje wstępną denaturację białek zawartych w pokarmie oraz działa zabójczo na większość drobnoustrojów znajdujących się w pokarmie.

? Wyjaśnij, dlaczego główny enzym żołądkowy – pepsyna – wydzielany jest w formie nieaktywnej.



30.5. Budowa żołądka

:: Ciekawostka

Od rodzaju pokarmu zależy to, jak długo trwa jego trawienie w żołądku. Pokarmy płynne o niskich wartościach pH są trawione szybko, co między innymi umożliwia przeżycie bakteriom mlekowym obecnym w jogurtach. Gdyby produkty nabiałowe tego typu miały wysokie pH, zalegałyby w żołądku znacznie dłużej, a to zwiększałoby ryzyko strawienia bakterii mlekowych przez enzymy obecne w soku żołądkowym.

Regulacja wydzielania soku żołądkowego

Wydzielanie soku żołądkowego rozpoczyna się na długo przedtem, zanim pokarm znajdzie się w żołądku. Proces ten stymulują widok i zapach pokarmu lub sama myśl o nim. Bodźce powstałe w korze mózgowej przekazywane są nerwem błędnym do żołądka. Pobudzenie to utrzymuje się 10–20 minut od chwili zadziałania bodźca (antagonistycznie do nerwu błędnego działa układ współczulny, dlatego np. przed egzaminem nie odczwa się głodu). Czynności wydzielnicze żołądka stymuluje również rozciąganie go przez pokarm. Prowadzi to do wydzielenia lokalnie hormonu tkankowego zwanego gastryną. Pobudza ona komórki gruczołów żołądkowych do produkcji składników soku żołądkowego.

:: Ciekawostka

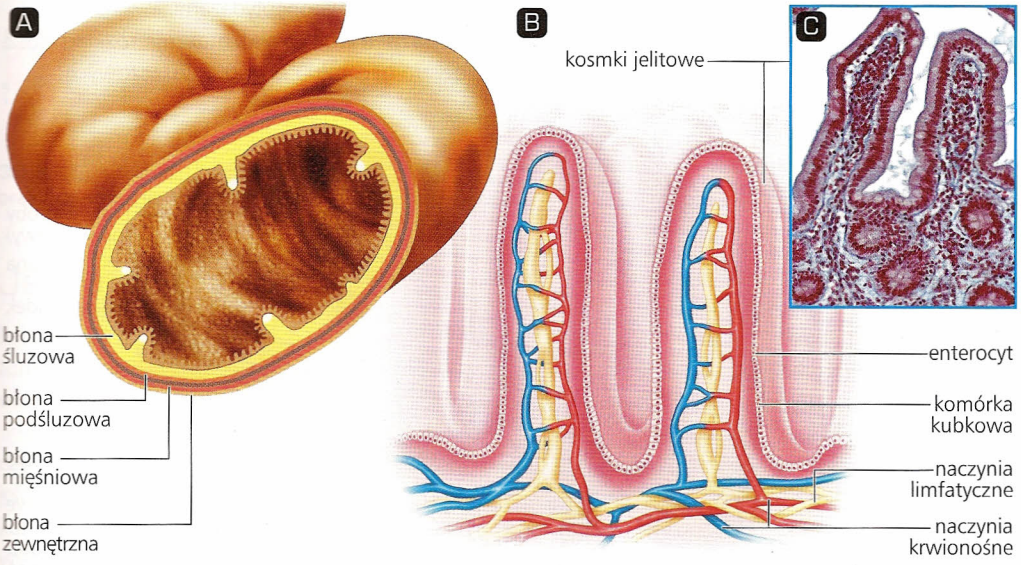
Przełyk Baretta jest stanem chorobowym dolnej części przełyku, w którym prawidłowy nabłonek wielowarstwowy płaski jest zastępowany przez charakterystyczny dla żołądka nabłonek walcowaty. Zmiana ta jest najczęściej następstwem refluksu żołądkowo-przełykowego, polegającego na okresowym zawracaniu kwaśnej treści żołądka w kierunku przełyku, czemu towarzyszą przykre dolegliwości (m.in. uczucie pieczenia w przełyku). Jej przyczyną mogą być na przykład nieprawidłowe nawyki żywieniowe i zbyt obfite posiłki. Choroba refluksowa może prowadzić do rozwoju stanów zapalnych błony śluzowej przełyku, a nawet do raka tego odcinka przewodu pokarmowego.

Jelito cienkie

Główną funkcją jelita cienkiego jest trawienie pokarmów i wchłanianie uzyskiwanych w tym procesie substancji odżywczych. Jelito cienkie zaczyna się za żołądkiem i jest najdłuższym odcinkiem przewodu pokarmowego (mierzy 4–5 m) **(30.6.)**. Wyróżnia się w nim trzy części: **dwunastnicę**, **jelito czcze** oraz **jelito kręte**. Ściana jelita cienkiego jest zbudowana z takich samych warstw jak ściana żołądka.

Dwunastnica

Dwunastnica to początkowy odcinek jelita cienkiego (o długości ok. 25 cm i średnicy 5 cm). Uchodzą do niej przewody wyprowadzające dwóch największych gruczołów trawiennych – **wątroby** i **trzustki**. Błona śluzowa dwunastnicy jest pozbawiona pofałdowania i grubsza niż w dalszych odcinkach jelita cienkiego.



30.6. Jelito cienkie (A), budowa kosmka jelitowego (B), mikrofotografia kosmków jelitowych (C)

Gruczoły trawienne

Wątroba

Funkcje dwunastnicy wyznaczają dwa duże gruczoły trawienne: wątroba i trzustka. Pierwszy z nich jest największym gruczołem ciała ludzkiego (waży ok. 1,5 kg). Wątroba bierze udział w gospodarce węglowodanowej organizmu (magazynuje glikogen oraz częściowo tłuszcze). Wytwarza również mocznik oraz pełni funkcję ochronną, oczyszczając krew z substancji toksycznych, które dostały się do organizmu drogą pokarmową. Stanowi także magazyn krwi oraz miejsce rozkładu starzejących się erytrocytów. Inną ważną funkcją wątroby jest wytwarzanie żółci umożliwiającej emulgację tłuszczów obecnych w pokarmie. Proces emulgacji polega na rozbiciu trudnej do strawienia porcji tłuszczu na drobne kropelki, co prowadzi do powstania emulsji. Duża liczba drobnych kropli tłuszczu o niewielkiej średnicy jest łatwiej dostępna dla enzymów trawiennych. Wyprodukowana przez wątrobę żółć gromadzi się w pęcherzyku żółciowym, skąd przewodem żółciowym przedostaje się do dwunastnicy, gdy tylko pojawi się w niej treść pokarmowa **(30.7.)**.

Trzustka

Trzustka pełni w organizmie dwie funkcje. Po pierwsze, działa jako gruczoł wydzielania wewnętrznego, produkujący hormony regulujące poziom cukru we krwi – **insulinę** i **glukagon** (szerzej opisano je w rozdziale poświęconym układowi hormonalnemu). Po drugie, trzustka współpracuje z układem trawiennym: wydziela tak zwany **sok trzustkowy**. Stanowi on główny czynnik w procesie enzymatycznego trawienia pokarmów.

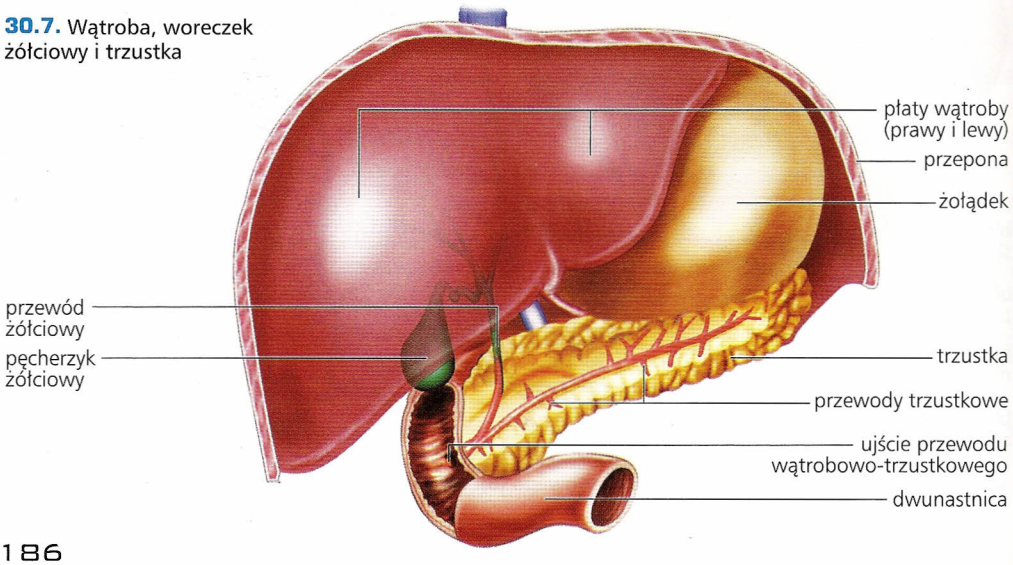
Sok trzustkowy jest wytwarzany w ilości około 1,2–1,5 litra na dobę i ma odczyn zasadowy (jego pH wynosi ok. 8,5). W skład soku trzustkowego wchodzą takie enzymy, jak: amylaza trzustkowa, trypsynogen i chymotrypsynogen oraz lipaza trzustkowa.

Amylaza trzustkowa to, podobnie jak amylaza ślinowa, enzym trawiący wielocukry. W wyniku ich rozkładu powstaje dwucukier maltoza, która zostaje następnie rozłożona za pomocą **maltazy** do glukozy.

Trypsynogen i **chymotrypsynogen** to dwa enzymy o podobnym działaniu wydzielane do dwunastnicy w postaci nieaktywnej (podobnie jak pepsynogen w żołądku). Trypsynogen jest przekształcany do aktywnej trypsyny przez enteropeptydazę. W aktywacji chymotrypsynogenu do aktywnej postaci chymotrypsyny bierze udział trypsyna. Oba enzymy odpowiadają za hydrolizę wiązań peptydowych występujących w białkach. W efekcie powstaje duża ilość oligopeptydów o łańcuchach różnej długości. Ich ostateczny rozkład do pojedynczych aminokwasów jest możliwy dzięki grupie enzymów nazywanych aminopeptydazami.

Lipaza trzustkowa katalizuje rozkład tłuszczów do glicerolu i kwasów tłuszczowych.

30.7. Wątroba, woreczek żółciowy i trzustka

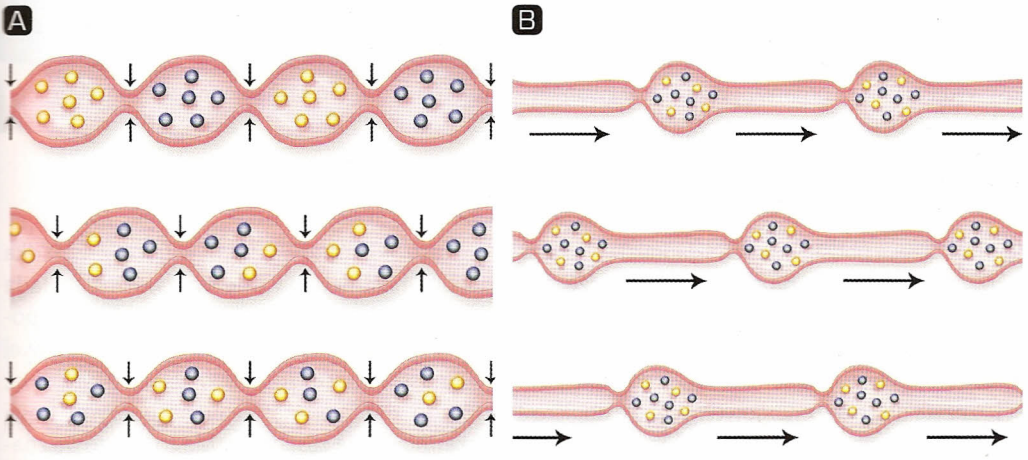


Jelito czcze i jelito kręte

Aby końcowe produkty trawienia mogły zostać spożytkowane przez organizm, muszą zostać wprowadzone do krwi. Wchłanianie zachodzące w ścianach jelita czczego i krętego zależy zarówno od wielkości powierzchni chłonącej, jak i od stężenia wchłanianych substancji. Elementami zwiększającymi powierzchnię wchłaniania jelit są **fałdy okrężne** oraz **kosmki jelitowe**. Wewnątrz każdego kosmka (o wysokości ok. 1,5 mm) znajduje się sieć naczyń krwionośnych oraz ślepo zakończone naczynie limfatyczne. Powierzchnia kosmków pokryta jest jednowarstwowym nabłonkiem migawkowym, na którym z kolei znajdują się mikrokosmki. Olbrzymia liczba kosmków jelitowych (sięgająca 10 mln) oraz występowanie mikrokosmków na powierzchni pokrywającego je nabłonka powodują znaczące zwiększenie powierzchni chłonnej jelita (do ok. 300 m^2).

Ruchy jelita cienkiego

Pokarm znajdujący się w jelicie może być trawiony i wchłaniany, ponieważ jest w ciągłym ruchu **(30.8.)**. W ten sposób miazga pokarmowa zostaje dokładnie wymieszana z sokami trawiennymi, a strawione substancje – wchłonięte. Ruch pokarmu odbywa się dzięki motoryce jelita cienkiego, za którą odpowiada jej tkanka mięśniowa. Bodźcami, które pobudzają mięśniówkę jelita do skurczów perystaltycznych, jest mechaniczne rozciąganie jelita przez pokarm, podrażnienie chemiczne wywołane działaniem soków trawiennych oraz bodźce nerwowe napływające za pośrednictwem nerwu błędnego.



30.8. Motoryka jelita cienkiego: mieszanie treści pokarmowej (A) oraz przesuwanie treści pokarmowej wzdłuż jelita (B)

? Wyjaśnij rolę i mechanizm ruchów jelita cienkiego.

Jelito grube

Jelito grube (o długości ok. 1,5 m) pod względem funkcjonalnym składa się z trzech części: **kątnicy**, **okrężnicy** i **odbytnicy (30.9.)**.

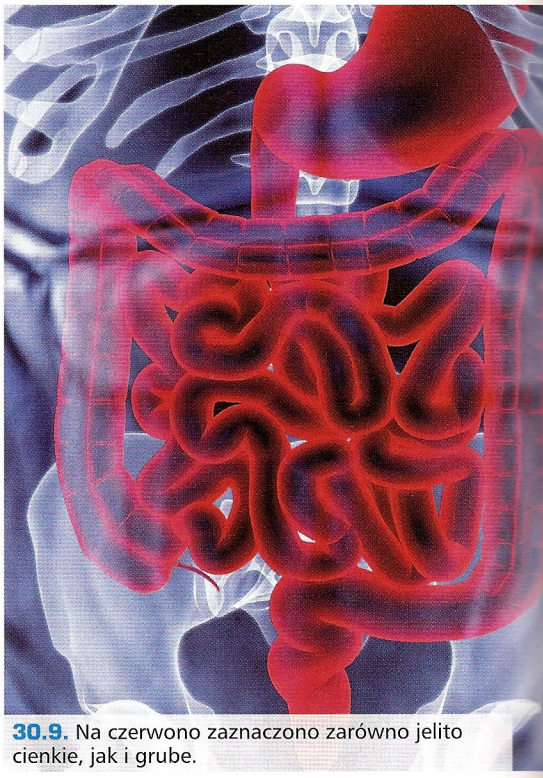
Najszerszą częścią jelita grubego jest kątnica, czyli inaczej **jelito ślepe**. Leży ono poniżej ujścia jelita cienkiego do jelita grubego i jest ślepo zakończone (stąd nazwa), odchodzi od niego jedynie wyrostek robaczkowy. Utworzona przez mięśnie początkowego odcinka jelita grubego zastawka krętniczo-kątnicza ma za zadanie zapobieganie cofaniu się treści pokarmowej z jelita grubego do jelita cienkiego. Leżąca za kątnicą okrężnica rozpoczyna się od zastawki krętniczo-kątniczej i biegnie ku górze wzdłuż prawego boku. Po osiągnięciu wysokości wątroby zagina się, biegnąc w kierunku lewego boku, a następnie ku dołowi, wzdłuż lewej ściany jamy brzusznej. Następnie prowadzi do położonej centralnie odbytnicy. Ten końcowy

odcinek jelita grubego (długości ok. 15–20 cm) zakończony jest odbytem, który odpowiada za proces defekacji. Służą do tego dwa okrężne mięśnie – zwieracze odbytu.

Rola jelita grubego

Charakterystyczną cechą jelita grubego jest wyjątkowo bogata flora bakteryjna. Obecne w okrężnicy bakterie zajmują się głównie rozkładem (na drodze fermentacji) niestrawionych i niewchłoniętych pozostałości węglowodanów, białek i tłuszczów. Do bakterii tych należy przede wszystkim gram-ujemna **pałeczka okrężnicy** (*Escherichia coli*), która oprócz fermentacji prowadzi rozkład rozmaitych steroli i steroidów oraz wytwarza witaminę K.

W jelicie grubym dochodzi do zwrotnego wchłaniania wody, dzięki czemu znacznie zagęszczona treść pokarmowa ulega zamianie w **kał**. Za formowanie masy kałowej odpowiada nabłonek jelita grubego wytwarzający dużą ilość mucyny, która zlepia niestrawione resztki pokarmu. Kał jest wydalany poza organizm w procesie zwanym defekacją.



30.9. Na czerwono zaznaczono zarówno jelito cienkie, jak i grube.

Trawienie pokarmów

Spośród trzech podstawowych składników pokarmowych dwa, czyli **węglowodany** i **tłuszcze**, są głównym źródłem energii dla organizmu. **Białka** natomiast dostarczają przede wszystkim materiału budulcowego – aminokwasów. Mogą one zostać zużyte do celów energetycznych, ale dopiero wtedy, gdy brakuje węglowodanów i tłuszczów lub gdy ilość białek znacząco przekroczyła zapotrzebowanie na nie.

Wszystkie substancje pokarmowe zawierają wiązania powstałe dzięki energii, która została wcześniej związana przez rośliny w procesie fotosyntezy. Aby odzyskać tę energię, organizmy wyższe muszą najpierw rozłożyć skomplikowane związki na prostsze elementy składowe. Wykorzystują w tym celu złożone mechanizmy trawienia, wśród których wyróżnić można **procesy mechaniczne** i **chemiczne**. W ich wyniku węglowodany zostają rozłożone na cukry proste (głównie glukozę, fruktozę, galaktozę), tłuszcze – do glicerolu i kwasów tłuszczowych, a białka – do aminokwasów.

Treść pokarmowa napływająca z żołądka do dwunastnicy ma odczyn kwaśny i składa się z częściowo rozłożonych składników pokarmowych. Zlokalizowane w błonie śluzowej dwunastnicy gruczoły wydzielają gęsty śluz, którego zadaniem jest zmiana odczynu treści pokarmowej na zasadowy. Ma to kluczowe znaczenie, gdyż enzymy trzustkowe oraz enzymy obecne w soku jelitowym działają tylko przy wysokich wartościach pH. W dwunastnicy, pod wpływem enzymów oraz żółci, dochodzi do trawienia chemicznego, czyli pełnego rozkładu białek, węglowodanów oraz tłuszczów na substancje proste.

Białka są rozkładane do pojedynczych aminokwasów. Rozkład węglowodanów (głównie skrobi) rozpoczyna się już w jamie ustnej, gdzie działa amylaza ślinowa inaktywowana następnie przez niskie pH soku żołądkowego. Trawienie wielocukrów kontynuuje w dwunastnicy amylaza trzustkowa, rozkładająca je do dwucukru maltozy. Ta jest z kolei rozkładana do glukozy przez

maltazę zawartą w soku jelitowym. Tłuszcze zostają strawione przez lipazę trzustkową do kwasów tłuszczowych i glicerolu. Powstałe w wyniku procesu trawienia cukry proste i aminokwasy zostają wchłonięte bezpośrednio na drodze dyfuzji do włosowatych naczyń krwionośnych przebiegających w kosmkach jelitowych. Zanim jednak przedostaną się do obiegu głównego, są dostarczane za pośrednictwem żyły wrotnej wątrobowej wprost do wątroby. Wchłanianie tłuszczów przebiega według nieco odmiennego mechanizmu. Produkty trawienia tłuszczów (glicerol oraz długołańcuchowe kwasy tłuszczowe) w połączeniu z żółcią wytworzoną w wątrobie tworzą niewielkie kropelki zemulgowanego tłuszczu. W tej postaci łatwo wnikają do komórek nabłonka jelita cienkiego. Następnie tłuszcze wnikają do centralnego naczynia limfatycznego.



PODSUMOWANIE

- Trawienie polega na rozkładzie złożonych substancji pokarmowych do związków prostych za pomocą procesów mechanicznych i chemicznych.
- W skład układu pokarmowego wchodzą przewód pokarmowy oraz gruczoły trawienne (wątroba, trzustka i ślinianki).
- Układ pokarmowy dzieli się na: jamę ustną, gruczoły ślinowe, gardło, przełyk, żołądek, jelito cienkie, wątrobę, trzustkę, jelito grube i odbytnicę.
- Ważnymi elementami jamy ustnej są zęby (zarówno 20 zębów mlecznych, jak i 32 zęby stałe), służące do obróbki mechanicznej pokarmu, oraz język z kubkami smakowymi.
- Żołądek i jelito cienkie są odcinkami przewodu pokarmowego, w których zachodzą właściwe procesy trawienia.
- W jelicie cienkim zachodzi wchłanianie substancji prostych powstałych w procesach trawiennych.
- Wątroba i trzustka biorą udział w regulacji poziomu cukru we krwi.
- W jelicie grubym następuje zwrotne wchłanianie wody i formowana jest masa kałowa, wydalana następnie przez odbyt.

ZADANIA

1. Omów mechanizm procesów trawiennych zachodzących w żołądku.
2. Wymień i scharakteryzuj enzymy trawienne wydzielane przez trzustkę.
3. Omów rolę żółci w procesach trawienia.
4. Wymień i scharakteryzuj elementy jelita grubego.
5. Porównaj proces defekacji i procesy wydalnicze realizowane za pośrednictwem nerek.

BIBLIOGRAFIA

- Kusztal E., *Wszystko o układzie pokarmowym*, Weltbild, 2011.

W INTERNECIE

- http://anatomiac.w.interia.pl/ukl_pok.html

31. Zapotrzebowanie energetyczne organizmu

Organizm człowieka cechuje określone zapotrzebowanie na **energię**. Wynika ono z uwarunkowanego genetycznie tempa procesów metabolicznych, zależy również od trybu życia, wieku oraz płci. Warunkiem zachowania **zdrowia** jest utrzymanie równowagi pomiędzy ilością energii dostarczanej z pożywieniem, a ilością wykorzystaną przez organizm.

Potrzeby energetyczne organizmu

Bardzo ważnym pojęciem stosowanym w dietetyce jest **bilans energetyczny organizmu**. Oznacza on różnicę między energią dostarczoną do organizmu wraz z pokarmem, a energią zużytą w procesach metabolicznych. Jeśli obie te wartości są sobie równe, wówczas bilans energetyczny wynosi zero, co jest sytuacją optymalną dla organizmu. Jeśli podaż energii przewyższa zapotrzebowanie na nią, wówczas bilans energetyczny jest dodatni. Sprzyja temu jedzenie nadmiernie kalorycznych posiłków, źle zbilansowanych pod względem zawartości tłuszczów i cukrów. Utrzymywanie przez dłuższy czas dodatniego bilansu energetycznego grozi stopniowym zwiększaniem masy ciała. Początkowo prowadzi to do nadwagi, a później – do otyłości, która jest główną przyczyną różnych schorzeń (m.in. nadciśnienia, chorób serca oraz cukrzycy). Bardzo negatywne konsekwencje może mieć także długotrwały **ujemny bilans energetyczny**, spowodowany dostarczaniem organizmowi dużo mniejszych ilości kalorii, niż wynosi optymalne zapotrzebowanie. Jest on charakterystyczną cechą wielu diet i może przyjmować rozmiary choroby (więcej na ten temat w dalszej części rozdziału).

W powyższej tabeli przedstawiono różnice w zapotrzebowaniu energetycznym osób w różnym wieku i różnej płci. Podane optymalne ilości energii są wartościami uśrednionymi i orientacyjnymi. Zapotrzebowanie na energię w dużym stopniu zależy od rodzaju aktywności człowieka, o której decyduje z kolei wykonywany zawód. Poszczególne zawody można przyporządkować do jednej z trzech grup, w zależności od tego, jaki tryb życia się z nimi wiąże:

- **tryb siedzący** (np. pracownik biurowy, kierowca, dziennikarz, lekarz)
- **tryb umiarkowanie aktywny** (np. listonosz, nauczyciel, kelnerka)
- **tryb aktywny** (np. pracownik fizyczny, żołnierz, górnik, zawodowy sportowiec).

Poza pracą zawodową różne zużycie energii cechuje także różne formy codziennej aktywności. Fakt ten należy uwzględnić, gdy określa się ilość kalorii dostarczanych organizmowi w planowanej diecie.

Zapotrzebowanie energetyczne organizmu człowieka (w kcal na dobę)

Grupa wiekowa	Dziewczęta	Chłopcy
1–3 lata	1300	
4–6 lat	1700	
7–9 lat	2100	
10–12 lat	2300	2600
13–15 lat	2600–2800	3000–3300
16–20 lat	2500–2700	3200–3700
Grupa wiekowa	**Kobiety**	**Mężczyźni**
21–60 lat	2100 (praca lekka) 3200 (praca ciężka) 3400 (karmiące)	2400 (praca lekka) 4500 (praca ciężka)
60–75 lat	2200	2300
powyżej 75 lat	2000	2100

Ilość energii zużywanej podczas różnego typu aktywności (kcal/godzinę)

Forma aktywności fizycznej	Kobiety	Mężczyźni
sen	56	76
jedzenie posiłków	66	66
spacer	168	224
gra w tenisa	332	442
wspinaczka wysokogórska	482	642
gra w piłkę nożną	650	864
bieg sprinterski	1032	1496

Wskaźniki masy ciała

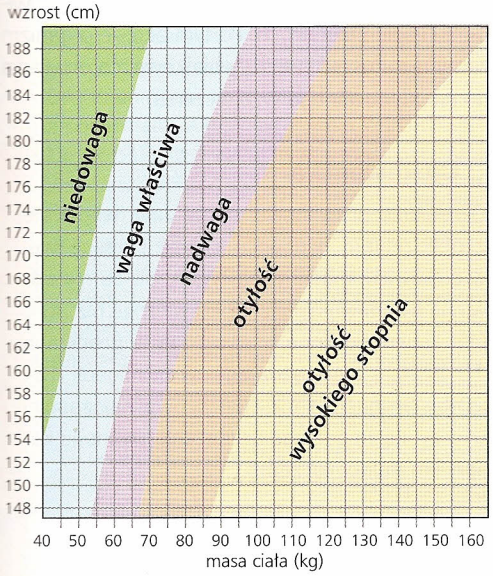
Optymalna masa ciała ma bardzo duże znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania organizmu. Masa ta zależy od wzrostu, typu budowy, płci, wieku oraz aktywności człowieka.

BMI

Zgodnie z wytycznymi WHO (Światowej Organizacji Zdrowia) najlepszą metodą określenia prawidłowego stosunku masy ciała do wzrostu jest wskaźnik **BMI** (ang. *Body Mass Index*). Jego wartość oblicza się za pomocą następującego wzoru:

$$\mathbf{BMI} = \frac{\mathbf{waga}\ [\text{kg}]}{\mathbf{wzrost}^2\ [\text{m}]}$$

Masę ciała można również szybko ocenić za pomocą poniższego wykresu **(31.1.)**, na którym oś Y oznacza wzrost, a oś X – masę ciała.



31.1. Wykres do oceny masy ciała

Interpretacja wartości indeksu BMI zgodnie z wytycznymi WHO		
Wartość BMI	**Klasyfikacja WHO**	**Ryzyko chorób**
18,5–24,9	prawidłowa masa ciała	małe
25,0–29,9	nadwaga	umiarkowane
30–34,9	I stopień nadwagi	znaczne
35–39,9	II stopień nadwagi	poważne
≥ 40,0	III stopień nadwagi	olbrzymie

Równanie Broca–Brugscha

Równie popularnym sposobem określenia idealnej wagi ciała jest **wzór Broca–Brugscha**.

Sposób obliczenia idealnej masy ciała w zależności od wzrostu	
Wzrost [cm]	**Idealna masa ciała [kg]**
155–164	wzrost [cm] – 100
165–174	wzrost [cm] – 105
175–185	wzrost [cm] – 110

Zarówno wskaźnik BMI, jak i wzór Broca–Brugscha określają zawartość tkanki tłuszczowej. Jednak nie tyle sama obecność tkanki tłuszczowej, ile jej rozmieszczenie wpływa w największym stopniu na rozwój schorzeń wynikających z otyłości.

Wskaźnik WHR

Do określenia lokalizacji nadmiaru tkanki tłuszczowej stosuje się wskaźnik WHR (ang. *waist to hip ratio*), który oznacza iloraz obwodu talii do obwodu bioder. Wyróżnia się w ten sposób dwa główne typy otyłości. **Otyłość trzewna** jest charakterystyczna dla mężczyzn i związana z gromadzeniem się nadmiaru tkanki tłuszczowej w rejonie brzucha i górnej części ciała (tzw. otyłość typu jabłka). **Otyłość gynoidalna** (pośladkowo-udową) jest charakterystyczna dla kobiet i polega na gromadzeniu się tkanki tłuszczowej w okolicach ud i pośladków (tzw. otyłość typu gruszki).

Wzór na obliczenie wskaźnika WHR:

$$\mathbf{WHR} = \frac{\mathbf{obwód\ w\ talii}\ [\text{cm}]}{\mathbf{obwód\ w\ biodrach}\ [\text{cm}]}$$

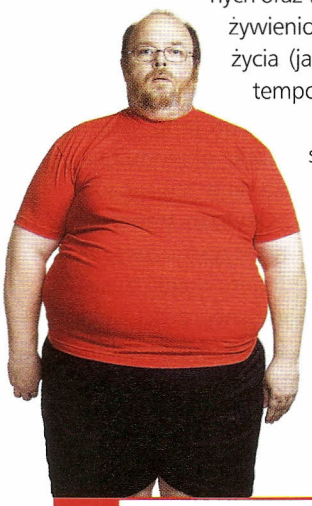
Należy pamiętać, że stosuje się go wyłącznie dla osób z nadwagą lub otyłością (BMI powyżej 25). Obwód talii powinien być mierzony na wysokości pępka, a obwód bioder – na wysokości spojenia łonowego.

O otyłości brzusznej mówi się, gdy wartości wskaźnika WHR są równe lub wyższe niż 0,85 dla kobiet oraz równe lub wyższe niż 1,0 dla mężczyzn. O otyłości gynoidalnej mówi się, gdy wartości wskaźnika WHR są niższe od 0,85 dla kobiet i niższe od 1,0 dla mężczyzn.

Otyłość

Otyłość stwierdza się, gdy masa ciała przekracza *masę prawidłową o co najmniej 20%. Choroba ta* stanowi przyczynę wielu zaburzeń fizjologicznych i schorzeń pojawiających się w jej następstwie. Można zatem przyjąć, że prowadzi ona do skrócenia długości życia. U ludzi otyłych zwiększa się bowiem znacznie ryzyko rozwoju: cukrzycy, miażdżycy, nadciśnienia tętniczego, chorób serca, kamicy żółciowej, a nawet chorób nowotworowch **(31.2.)**.

Większą skłonność do otyłości mają kobiety, zwłaszcza w okresie ciąży, połogu (po urodzeniu dziecka) oraz menopauzy. Występujące wówczas zaburzenia równowagi hormonalnej są przyczyną odkładania większej niż normalnie ilości tkanki tłuszczowej. Przyczyn powstawania nadwagi i otyłości upatruje się głównie w czynnikach genetycznych oraz w niewłaściwych nawykach żywieniowych i niezdrowym trybie życia (jak np. brak ruchu, szybkie tempo życia, znaczny stres).



31.2. Otyłość jest zawsze groźna dla organizmu.

? Jakie choroby mogą być skutkiem otyłości?

Najskuteczniejszym sposobem uniknięcia wiążących się z otyłością chorób jest niedopuszczenie do jej rozwoju. Wymaga to wykształcenia już w dzieciństwie właściwych nawyków żywieniowych. Nagły spadek masy ciała *osiągany za pomocą środków farmakologicznych jest* chwilowy i może prowadzić do licznych zaburzeń zdrowotnych (przede wszystkim odwodnienia i utraty masy mięśniowej). Jedynie prowadzenie odpowiedniego trybu życia pozwala stopniowo i trwale obniżyć masę ciała. Istotna jest zwłaszcza regularna aktywność fizyczna (dłuższy wysiłek o małej i średniej intensywności) w połączeniu z urozmaiconą dietą dostarczającą organizmowi ograniczoną ilość kalorii. Dieta taka nie może polegać na eliminowaniu pokarmów i przyjmowania ich w możliwie najmniejszych ilościach, lecz powinna zapewniać optymalną ilość witamin, składników mineralnych, enzymów i białka oraz ograniczoną ilość węglowodanów i tłuszczów. Zapasy energetyczne organizmu pozwalają człowiekowi przeżyć bez jedzenia nawet około czterech miesięcy, pod warunkiem dostarczenia odpowiednich ilości witamin i soli mineralnych. Po tym okresie organizm zaczyna naruszać struktury białkowe, co prowadzi do nieodwracalnego wyniszczenia.

:: Ciekawostka

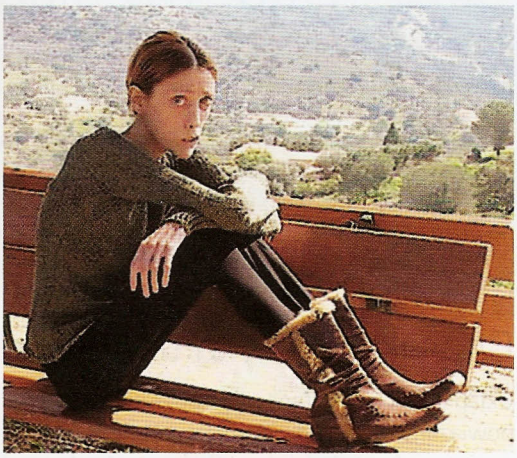
Określenie prawidłowej masy ciała wiąże się z obliczeniem procentu tkanki tłuszczowej w całkowitej masie ciała. Wielkość ta nie powinna być mniejsza niż 12% i większa niż 30% (dla kobiet powinna mieścić się w granicach 18–22%, a dla mężczyzn – w granicach 15–20%). Grubość tkanki tłuszczowej najczęściej mierzy się za pomocą urządzenia zwanego kaliperem (fałdomierzem).

Bulimia

Bulimia (inaczej: żarłoczność psychiczna) to choroba, która polega na nałogowym pochłanianiu dużych ilości pokarmu w krótkim czasie. Okresy jedzenia są oddzielone okresami bardzo ścisłej diety. Bywa, że chorzy na bulimię uprawiają intensywne ćwiczenia fizyczne, częściej jednak wzbudzają u siebie odruch wymiotny lub zażywają duże ilości środków przeczyszczających i odwadniających. Usiłują w ten sposób przeciwdziałać skutkom nieopanowanej chęci jedzenia. W bulimii, podobnie jak w anoreksji, występuje obsesja na punkcie masy ciała i jedzenia. Większość osób chorujących na bulimię ma normalną wagę lub lekką nadwagę. Swój nałóg jedzenia utrzymują w ścisłej tajemnicy, nawet przed najbliższą rodziną. Na bulimię najczęściej cierpią kobiety pomiędzy 15. a 24. rokiem życia. Początek choroby może być poprzedzony przez silne przeżycia psychiczne, jak śmierć ukochanej osoby czy problemy natury osobistej. Ilość jedzenia pochłanianego podczas napadu żarłoczności może nawet trzydziestokrotnie przekraczać ilość pokarmu zjadaną w normalnych okolicznościach.

Anoreksja

Anoreksja (inaczej: jadłowstręt psychiczny) jest chorobą manifestującą się brakiem łaknienia. Pojawia się najczęściej w wieku młodzieńczym, zdecydowanie częściej u dziewcząt niż u chłopców. Zaburzenie to polega na świadomym powstrzymywaniu się od spożywania pokarmów. Bardzo często towarzyszy mu depresja, niska samoocena i niedojrzałość psychiczna (lęk przed wejściem w dojrzałość i rolę kobiety-matki). Osoby pragnące za wszelką cenę utrzymać szczupłą sylwetkę mogą w krótkim czasie doprowadzić się do całkowitego wyniszczenia (u kobiet z reguły dochodzi do zaniku miesiączki). W skrajnych przypadkach jadłowstręt może prowadzić nawet do śmierci. Leczenie anoreksji polega głównie na psychoterapii i terapii rodzinnej **(31.3.)**.



31.3. Anoreksja w zaawansowanym stadium przyjmuje objawy zagrażające życiu.

PODSUMOWANIE

- Zapotrzebowanie energetyczne organizmu wynika z uwarunkowań genetycznych, zależy też od trybu życia, wieku oraz płci.
- Bilans energetyczny organizmu jest różnicą między energią dostarczoną do organizmu wraz z pokarmem, a energią zużytą w procesach metabolicznych.
- Do określenia prawidłowej masy ciała służą: wskaźnik BMI, równanie Broca–Brugscha oraz wskaźnik WHR.
- Otyłość jest stanem będącym wynikiem długotrwałego utrzymywania się dodatniego bilansu energetycznego.
- Bulimia (inaczej: żarłoczność psychiczna lub wilczy głód) polega na okresowym spożywaniu dużych ilości pokarmu, a następnie wywoływaniu wymiotów lub zażywaniu środków przeczyszczających i odwadniających.
- Anoreksja (inaczej: jadłowstręt psychiczny) manifestuje się całkowitym brakiem łaknienia.

ZADANIA

1. Oceń wpływ wykonywanej pracy na bilans energetyczny organizmu.
2. Oblicz wartość BMI dla mężczyzny o wzroście 185 cm, ważącego 98 kg.
3. Porównaj zastosowanie wskaźnika BMI i WHR.
4. Porównaj podłoże i objawy bulimii i anoreksji.

BIBLIOGRAFIA

- Kunachowicz H., Nadolna I., Iwanow K., *Liczmy kalorie*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2011.

W INTERNECIE

- http://www.wygrajznadwaga.pl

32. Budowa układu oddechowego

U organizmów o prostej budowie (jednokomórkowych) wymiana gazowa odbywa się całą powierzchnią ciała. Dla organizmów o większej masie i objętości powierzchnia ciała jako obszar wymiany gazowej okazuje się niewystarczająca. Dlatego w toku ewolucji wykształciły one narządy oddechowe, pozwalające na sprawne pobieranie tlenu z wody lub powietrza atmosferycznego. U owadów, ze względu na ich niewielkie rozmiary, narządy te mają postać cienkich, rozgałęzionych **tchawek**. Z kolei u znacznie większych od nich kręgowców występują **skrzela** lub coraz bardziej skomplikowane **płuca**. Największą złożoność budowy wykazują płuca ssaków (w tym człowieka). Umożliwiają one utrzymanie wysokiego tempa metabolizmu typowego dla organizmów stałocieplnych.

Charakterystyka układu oddechowego

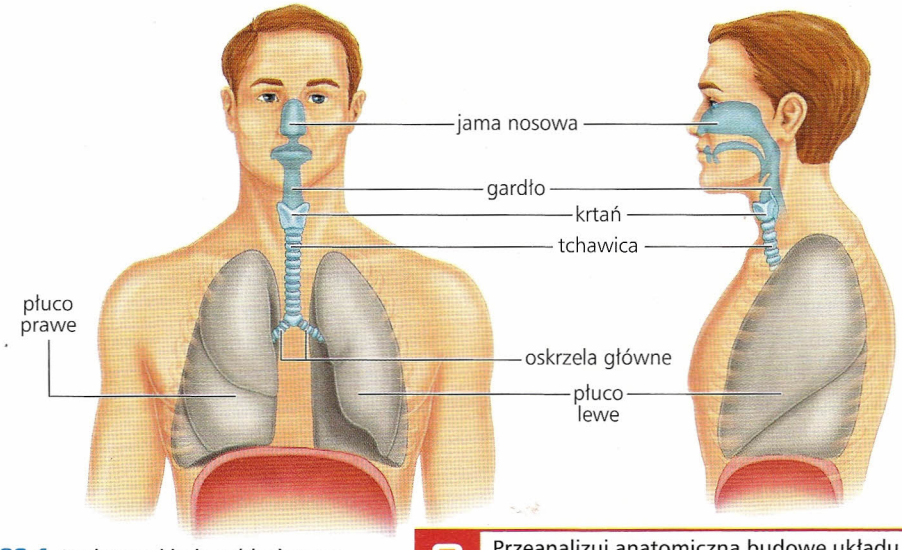
Układ oddechowy stanowi zespół funkcjonalnie powiązanych narządów, służących do wymiany gazowej pomiędzy organizmem a środowiskiem. U człowieka oraz innych ssaków właściwym narządem wymiany gazowej są parzyste płuca o budowie pęcherzykowej. Zajmują one większą część jamy klatki piersiowej. Powietrze dociera do nich za pośrednictwem kanałów tworzących **górne** i **dolne drogi oddechowe**. W skład górnych dróg oddechowych wchodzą **jama nosowa** i **gardło** (będące również częścią układu pokarmowego), natomiast dolne drogi oddechowe tworzą: **krtań**, **tchawica** oraz **oskrzela** (32.1.).

Górne drogi oddechowe

Funkcja tego odcinka układu oddechowego polega głównie na przemieszczeniu porcji wdychanego powietrza w kierunku płuc, a w czasie wydechu – z płuc na zewnątrz. Zadaniem górnych dróg oddechowych jest także ogrzanie, oczyszczanie oraz nawilżanie wdychanego powietrza.

Jama nosowa

Pierwszym odcinkiem górnych dróg oddechowych jest przestronna jama nosowa, która znajduje się za tak zwanymi **nozdrzami zewnętrznymi**. Są to dwa parzyste otwory wprowadzające do niej powietrze. Jama nosowa przedzielona jest za pomocą **przegrody nosowej** na część lewą i prawą.



32.1. Budowa układu oddechowego człowieka (widok z przodu i z boku)

? Przeanalizuj anatomiczną budowę układu oddechowego człowieka jako zwierzęcia stałocieplnego.

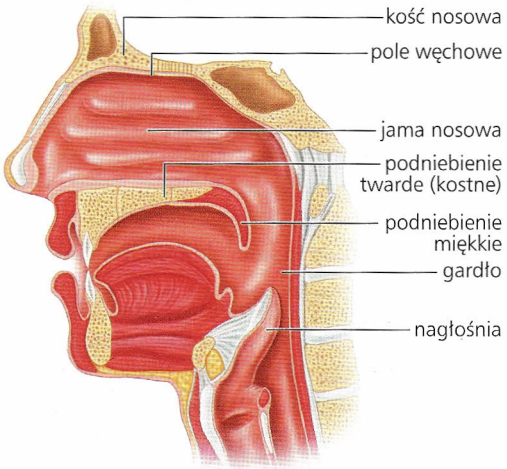
Z kolei pod względem czynnościowym wyróżnia się część **węchową** oraz **oddechową** jamy nosowej.

Okolica węchowa jamy nosowej, mieszcząca się w jej górnej części, odpowiada za odbieranie wrażeń zapachowych. Obszar ten pokrywa urzęsiony nabłonek węchowy, noszący nazwę **pola węchowego**. Znajdujące się w nim liczne komórki receptorowe odpowiedzialne są za rozpoznawanie zapachów. Powierzchnia nabłonka węchowego pokryta jest warstwą śluzu (substancja chemiczna musi najpierw zostać rozpuszczona w ciekłym ośrodku, inaczej jej rozpoznanie nie byłoby możliwe) (32.2.).

Okolica oddechowa jamy nosowej to pozostała część tej jamy, leżąca poniżej okolicy węchowej. Dzięki bogatemu unaczynieniu pokrywającego ją nabłonka wdychane powietrze zostaje ogrzane i nasycone parą wodną. Jest również oczyszczane (zanieczyszczenia są wychwytywane przez mikrokosmki komórek nabłonka lub osiadają na wilgotnej błonie śluzowej). Dzięki temu wdychane do płuc powietrze jest w miarę czyste, a także nie wysusza ani nie oziębia dróg oddechowych i samych płuc. Dlatego bardzo ważne jest, aby wdychać powietrze przez nos, zwłaszcza zimą lub w miejscach o dużym zapyleniu.

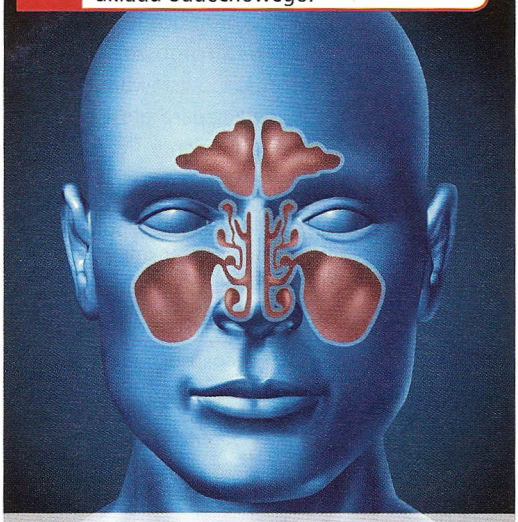
Do jamy nosowej uchodzą **zatoki przynosowe**. Są to puste przestrzenie w pneumatycznych kościach czaszki, pokryte błoną śluzową i wypełnione powietrzem (32.3.).

? Dlaczego wskazane jest oddychanie przez nos, a nie przez usta?



32.2. Budowa górnych dróg oddechowych człowieka

? Wyjaśnij rolę zatok w funkcjonowaniu układu oddechowego.



32.3. Rozmieszczenie zatok pneumatycznych kości czaszki

Gardło

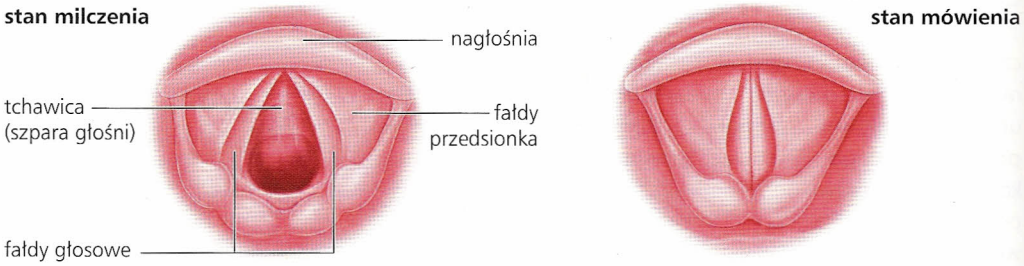
Gardło jest odcinkiem górnych dróg oddechowych położonym za jamą nosową. Powietrze z jamy nosowej przedostaje się do niego poprzez tak zwane **nozdrza wewnętrzne**. Krzyżujące się w gardle drogi oddechowe i pokarmowe mogą sprawnie i bez zakłóceń funkcjonować dzięki **nagłośni**. To nieparzysty fałd zamykający wejście do krtani w momencie przełykania pokarmu lub picia płynów.

Dolne drogi oddechowe

Krtań

Krtań jest odcinkiem dolnych dróg oddechowych zbudowanym z około dziewięciu chrząstek (stanowiących jej szkielet), połączonych za pomocą mięśni, więzadeł oraz błon łącznotkankowych. Krtań to również narząd umożliwiający powstawanie głosu. W jej wnętrzu, poniżej wejścia zamkniętego nagłośnią, zlokalizowane są **fałdy głosowe** (inaczej: **struny głosowe**).

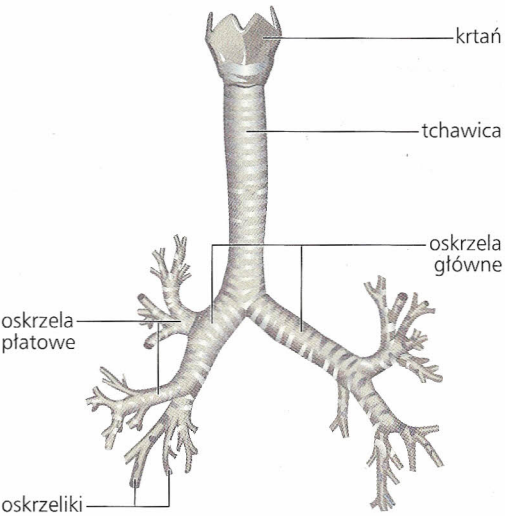
? Porównaj zmiany wzajemnego ułożenia strun głosowych w czasie mówienia i szeptania.



32.4. Zmiany ułożenia strun głosowych w czasie wydawania dźwięków i w stanie milczenia

Struny głosowe zbudowane są z tkanki łącznej i mięśni. Ich cechą szczególną jest zdolność do wzbudzania drgań **(32.4.)**. Pomiędzy strunami głosowymi znajduje się przestrzeń zwana szparą głośni. Drgania strun głosowych prowadzą do powstania drgań przepływającego powietrza, czyli dźwięku. Jego wysokość zależy od długości strun głosowych oraz stopnia ich napięcia w momencie mówienia, na co wpływa mięsień głosowy. Struny głosowe kobiet są krótsze i cieńsze, a zatem głos uzyskiwany za ich pomocą jest wyższy. U mężczyzn struny głosowe są grubsze i dłuższe, a ich drgania prowadzą do powstawania głosu niskiego. Podczas milczenia szpara głosowa jest otwarta całkowicie, a podczas szeptu – częściowo (umożliwia to emisję dźwięków o niewielkiej głośności). Drgania strun głosowych nie umożliwiają wydawania artykułowanych dźwięków. Jest to możliwe jedynie we współpracy z językiem, podniebieniem oraz policzkami.

? Jaką rolę odgrywają elastyczne połączenia między chrząstkami budującymi tchawicę i oskrzela główne?



32.5. Budowa tchawicy i oskrzeli głównych

Tchawica i oskrzela

Tchawica (o długości ok. 12 cm) jest przedłużeniem krtani. Jej przednie i boczne ściany buduje od 16 do 20 chrząstek tchawiczych, mających podkówkowaty kształt i utworzonych przez tkankę chrzęstną szklistą **(32.5.)**. Tylna ściana tchawicy sąsiaduje z przełykiem i jest zbudowana z błony mięśniowej. Dzięki temu, że tchawica jest jednocześnie elastyczna i w odpowiednim stopniu sztywna, zapewnia stały dostęp powietrza do położonych poniżej płuc. W końcowym odcinku tchawica rozgałęzia się na oskrzela. Są one jej naturalnym przedłużeniem i, podobnie jak ona, są zbudowane z podkówkowatych chrząstek. Tak samo też ich wnętrze pokryte jest nabłonkiem migawkowym, zawierającym komórki surowiczo-śluzowe. Dzięki ruchom rzęsek śluz obecny w świetle oskrzeli i tchawicy powoli się przesuwa. Osiadają w nim różne substancje (np. składniki dymu papierosowego, pył i kurz). Umożliwia to usunięcie z ustroju większości zanieczyszczeń fizycznych i biologicznych.

Płuca

Płuca to parzysty narząd stożkowatego kształtu, wypełniający niemal całe wnętrze jamy klatki piersiowej. Od momentu narodzin stale wypełnia je porcja powietrza. Ponieważ serce w większej części jest zlokalizowane po lewej stronie mostka, lewe płuco jest nieco mniejsze od prawego. Wielkość i pojemność płuc zależy od wieku i płci (kobiety mają mniejsze płuca niż mężczyźni).

Płuco lewe dzieli się na dwa płaty, a prawe – na trzy płaty. Oskrzele główne po wniknięciu do płuca rozgałęzia się na **oskrzela płatowe** (dwa w płucu lewym i trzy w płucu prawym). Wnikając coraz bardziej w głąb płuca, dzielą się one na coraz drobniejsze oskrzela, a dalej na jeszcze mniejsze i liczniejsze oskrzeliki. Na końcu najdrobniejszych przewodów znajdują się woreczkowate rozszerzenia złożone z wielu cienkościennych pęcherzyków płucnych, będących najmniejszą jednostką funkcjonalną płuca **(32.6.)**.

Pęcherzyki płucne mogą efektywnie spełniać swoje funkcje dzięki odpowiedniej budowie oraz sprawnej wentylacji. Ściany pęcherzyków oraz oplatających je naczyń włosowatych muszą być jak najcieńsze, zbudowane są zatem z nabłonka jednowarstwowego płaskiego. Stanowi on przeszkodę łatwą do pokonania dla gazów oddechowych dyfundujących wewnątrz pęcherzyków.

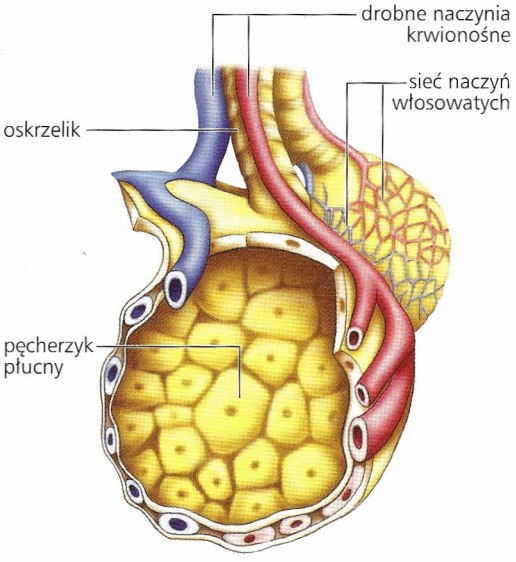
W czasie oddychania zmienia się zarówno objętość płuc, jak i objętość i średnica pęcherzyków płucnych (podczas wdechu średnica ta wynosi ok. 0,5 mm, a w fazie wydechu – ok. 0,15 mm).

Ponieważ w czasie wydechu na skutek pojawiającego się podciśnienia pęcherzyki płucne mogłyby się zapadać, wewnętrzną ich ściankę pokrywa cienka warstwa tak zwanego **surfaktantu**. Jego zadaniem jest obniżenie napięcia powierzchniowego ściany pęcherzyka. Dzięki temu ryzyko zapadnięcia się pęcherzyka zmniejsza się do minimum.

:: Ciekawostka

Jedna z chrząstek tworzących krtań ma charakterystyczną budowę. To nieparzysta chrząstka tarczowata, złożona z dwóch płytek, które łączą się ze sobą pod pewnym kątem. W zależności od płci i wieku kąt ten może być różny. U dorosłych mężczyzn wynosi on około 120°, co powoduje, że na przodzie szyi powstaje wyraźne uwypuklenie (tzw. jabłko Adama).

? Wyjaśnij, dlaczego całkowita powierzchnia wymiany gazowej w płucach jest wyjątkowo duża.



32.6. Schemat rozgałęzień końcowych oskrzeli

Opłucna

Opłucna to błona surowicza, która pokrywa wewnętrzne ściany klatki piersiowej oraz płuco. Pomiędzy nimi występuje cienką przestrzeń zwana jamą opłucnową. Zawiera ona niewielką ilość płynu surowiczego, który odpowiada za zmniejszenie tarcia w czasie ruchów wdechowych.

:: Ciekawostka

Jedną z metod pierwszej pomocy jest tak zwany manewr Heimlicha (lub rękoczyn Heimlicha). Stosuje się go u osób, które uległy zadławieniu. Pozwala on usunąć ciało obce z dróg oddechowych, gdy zawiodły inne metody (np. odksztuszanie). Aby wykonać ten manewr, należy stanąć za osobą poszkodowaną i objąć jej tułów na wysokości nadbrzusza. Jedną rękę zaciśniętą w pięść należy przyłożyć między pępkiem a wyrostkiem mieczykowatym mostka. Następnie należy chwycić ją drugą ręką i szybkim, zdecydowanym ruchem wgnieść do siebie i ku górze. Dzięki zwielokrotnieniu działania tłoczni brzusznej dochodzi do znacznego sprężenia powietrza w jamie opłucnej, co powoduje, że ciało obce zostaje wypchnięte przez usta na zewnątrz.

:: Ciekawostka

Płuca płodu nie zawierają powietrza, a ich barwa jest intensywnie czerwona. Gdy zaraz po urodzeniu wypełnia je powietrze, stają się różowe. U **dorosłych** są szare, a u osób starszych nawet czarne. Stopniowa zmiana barwy płuc jest spowodowana tym, że osiadają w nich cząsteczki węgla pochodzące z sadzy oraz inne zanieczyszczenia (np. składniki dymu papierosowego).

PODSUMOWANIE



- Głównym narządem wymiany gazowej u ssaków (w tym u człowieka) są parzyste płuca o budowie pęcherzykowej.
- Kanały doprowadzające powietrze do płuc dzieli się na górne i dolne drogi oddechowe.
- Pierwszym odcinkiem dróg oddechowych jest jama nosowa, do której prowadzą nozdrza zewnętrzne.
- Jamę nosową pod względem funkcjonalnym dzieli się na część węchową (górną) oraz oddechową (dolną).
- Do jamy nosowej uchodzą zatoki przynosowe: czołowa, klinowa i szczękowa.
- Gardło, do którego prowadzą nozdrza wewnętrzne, jest miejscem krzyżowania się dróg oddechowych i pokarmowych.
- W trakcie połykania pokarmu wejście do dolnych dróg oddechowych jest zamykane fałdem nagłośni.
- Krtań jest odcinkiem układu oddechowego odpowiedzialnym za emisję głosu.
- Powstawanie głosu jest możliwe dzięki obecnym w krtani strunom głosowym.
- Tchawica (o długości ok. 12 cm) jest zbudowana z licznych chrząstek podkówkowatego kształtu.
- Tchawicę pokrywa nabłonek migawkowy, odgrywający szczególną rolę w oczyszczaniu dróg oddechowych z zanieczyszczeń fizycznych i biologicznych.
- Stanowiące główny narząd wymiany gazowej płuca mają gąbczastą i płatową strukturę.
- Najmniejszą jednostką funkcjonalną płuc jest pęcherzyk płucny, zbudowany z jednej warstwy komórek nabłonka płaskiego.

ZADANIA



1. Wymień elementy wchodzące w skład górnych i dolnych dróg oddechowych.
2. Opisz, co się dzieje z powietrzem wpływającym do jamy nosowej.
3. Opisz mechanizm powstawania głosu (fonacji).
4. Wyjaśnij, dlaczego nie należy rozmawiać w trakcie jedzenia.
5. Scharakteryzuj strukturę płuc człowieka.

BIBLIOGRAFIA



- Jakob M., *Układ oddechowy. Kieszonkowy przewodnik*, VM Group, 2007.

W INTERNECIE



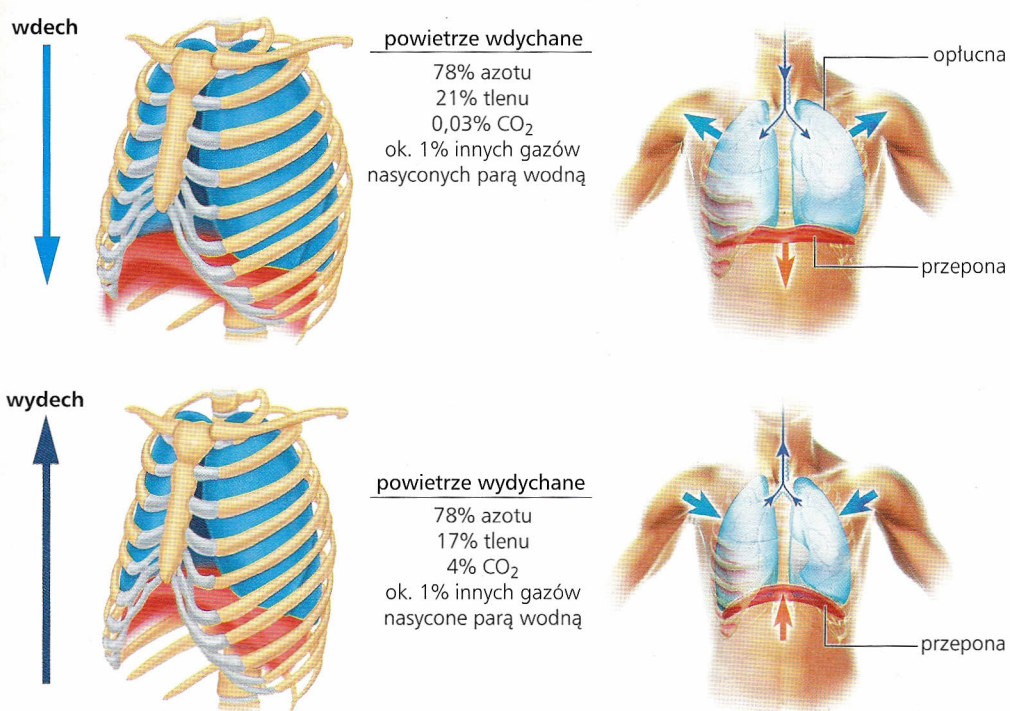
- http://www.pta.med.pl
- http://www.muko.pl/poradnik/uklad-oddechowy/choroba-ukladu-oddechowego

33. Mechanizm wymiany gazowej

W normalnych warunkach oddychanie jest czynnością odruchową (wykonywaną bez udziału świadomości), jednak w szczególnych okolicznościach można świadomie przyspieszyć lub czasowo wstrzymać oddech. Pracę wykonywaną przez układ oddechowy dzieli się na dwie fazy: **wdechu** (kiedy płuca napełniają się powietrzem) oraz **wydechu** (gdy powietrze zostaje usunięte z płuc na zewnątrz). Sprawną wymianę gazową oraz funkcjonowanie układu oddechowego umożliwiają mechanizmy, dzięki którym zmienia się objętość klatki piersiowej. Jest to wynikiem współpracy elementów układu szkieletowego (żeber i kręgów odcinka piersiowego kręgosłupa) oraz mięśni międzyżebrowych i przepony.

Mechanika wdechu

Wdech polega na napełnieniu płuc powietrzem i jest możliwy dzięki temu, że ściany klatki piersiowej rozciągają się we wszystkich kierunkach. To skutek współpracy mięśni wdechowych, z których najważniejsze są **przepona** oraz **mięśnie międzyżebrowe**. Przepona jest jednym z najsilniejszych mięśni organizmu. Oddziela dwie duże jamy ciała: jamę klatki piersiowej i jamę brzuszną. Gdy znajduje się w stanie spoczynku (faza wydechowa), przyjmuje kształt kopuły. Gdy z ośrodka oddechowego znajdującego się w rdzeniu przedłużonym napłynie informacja o konieczności wykonania wdechu, następuje skurcz przepony, co prowadzi do jej spłaszczenia. W tym samym momencie dochodzi do skurczu mięśni międzyżebrowych, w wyniku czego mostek wysuwa się ku przodowi, a żebra unoszą się do góry i na boki. Skurcz wymienionych grup mięśni skutkuje znacznym zwiększeniem objętości klatki piersiowej. Wewnątrz szczelnej jamy opłucnej wytwarza się podciśnienie, które rozciąga pęcherzyki płucne. Ciśnienie wewnątrz nich spada, wskutek czego powietrze z zewnątrz (o wyższym ciśnieniu) zostaje zassane do płuc **(33.1.)**.



33.1. Mechanizm wdechu i wydechu

Mechanika wydechu

Wydech, w przeciwieństwie do wdechu, jest procesem biernym. Następuje w momencie, gdy impulsy z ośrodka oddechowego przestają pobudzać mięśnie wdechowe do skurczu. Na skutek tego ulegają one rozkurczowi, przepona ponownie uwypukla się w stronę jamy opłucnej, a klatka piersiowa zapada się dzięki ciężarowi własnemu. Podczas wykonywania pogłębionego wydechu proces ten jest dodatkowo wspomagany przez tak zwaną **tłocznię brzuszną**. To ciśnienie, jakie wywierają narządy wewnętrzne jamy brzusznej w czasie skurczu mięśni brzucha. W wyniku zmniejszenia objętości klatki piersiowej powietrze znajdujące się w płucach zostaje wypchnięte na zewnątrz. W ten sposób następuje wydech **(33.1.)**.

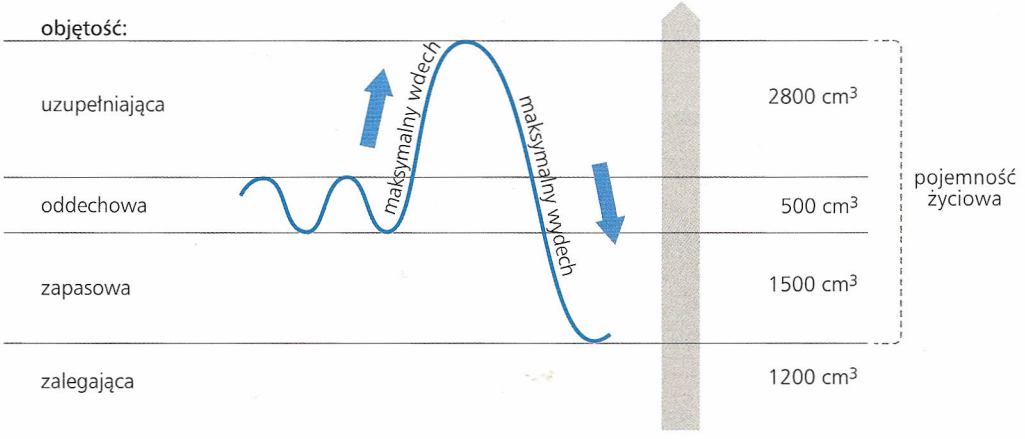
Objętościowy bilans wymiany gazowej w płucach

Całkowita pojemność płuc dorosłego człowieka wynosi około 6000 cm^3, z czego podczas swobodnego wdechu i wydechu wymienionych zostaje około 500 cm^3 powietrza. To tak zwana **objętość oddechowa płuc**, która wydaje się niewielka w porównaniu z objętością całkowitą, jednak zupełnie wystarcza do prowadzenia normalnej aktywności. Przeciętnie wykonuje się od 12 do 15 wdechów na minutę, więc objętość wymienionego powietrza wynosi od 6 do 7,5 litra. Gdy aktywność organizmu wzrasta, objętość oddechowa przestaje wystarczać. Oddechy stają się więc głębsze i częstsze. Płuca mogą wówczas przyjąć dodatkowo około 2800 cm^3 powietrza (jest to tzw. **objętość uzupełniająca płuc**). Oprócz tego część zalegającego normalnie w płucach powietrza może zostać usunięta w czasie wydechu. To tak zwana **objętość zapasowa płuc**, która wynosi około 1500 cm^3.

Objętość oddechową, uzupełniającą oraz zapasową określa się wspólnie jako **pojemność życiową płuc**. Jest to największa objętość powietrza, jaka może zostać wymieniona podczas maksymalnego wdechu i wydechu. Należy również pamiętać o tak zwanej **objętości zalegającej**, która stale wypełnia wszystkie kanały oddechowe w płucach (oskrzela, oskrzeliki, pęcherzyki płucne) i nie zmienia się zarówno podczas wdechu, jak i wydechu. Dopiero zsumowanie pojemności życiowej z objętością zalegającą pozwala określić całkowitą pojemność płuc. W przedstawionym przykładzie pojemność życiowa płuc wynosi około 4800 cm^3, objętość zalegająca – około 1200 cm^3, a objętość całkowita jest równa 6000 cm^3 **(33.2.)**.

:: Ciekawostka

W trakcie swobodnego oddechu do pęcherzyków płucnych dociera jedynie około dwóch trzecich powietrza (czyli ok. 350 cm^3). Pozostała jedna trzecia (ok. 150 cm^3) to tak zwana anatomiczna przestrzeń martwa, która wypełnia drogi oddechowe i nie bierze udziału w wymianie gazowej.



33.2. Bilans wymiany gazowej w płucach

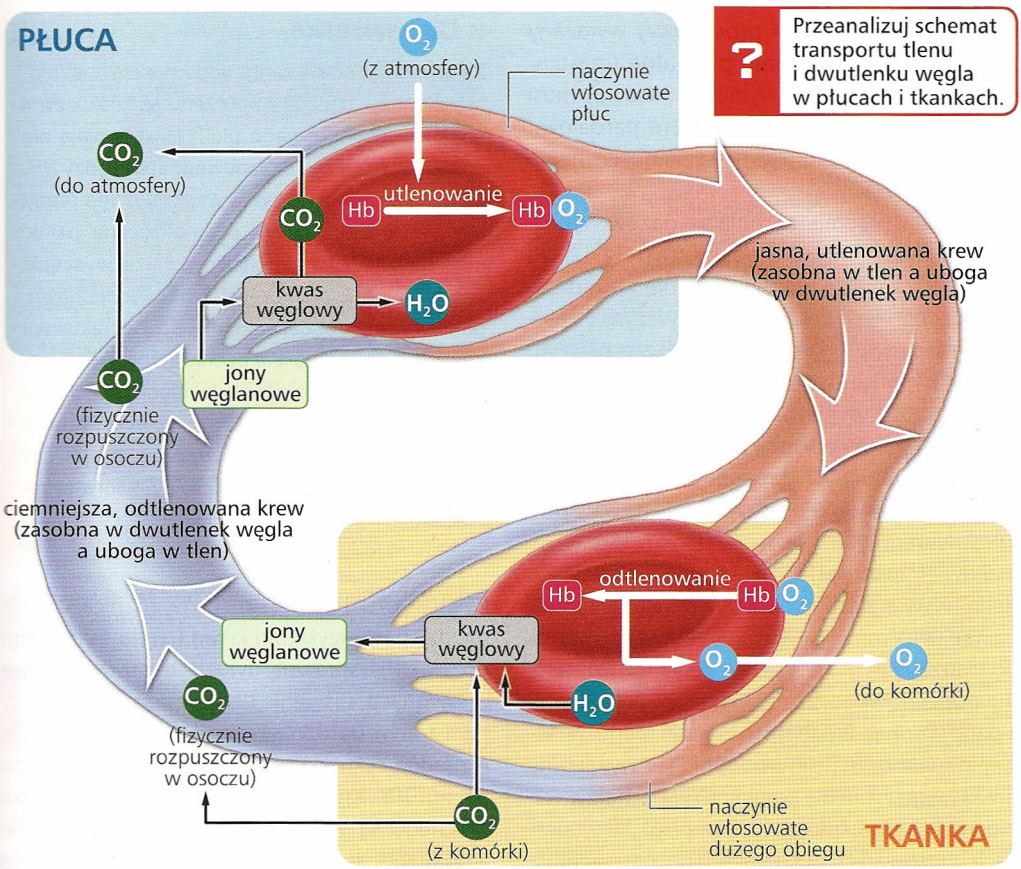
Transport tlenu i rola hemoglobiny w procesie wymiany gazowej

Jak wiadomo, to krew transportuje do tkanek tlen pobrany w płucach. Przeciętne zapotrzebowanie organizmu na tlen (ok. 300 ml tlenu na minutę) w czasie intensywnego wysiłku może wzrosnąć nawet dziesięciokrotnie. Rozpuszczalność tlenu w osoczu jest niewielka i w przybliżeniu wynosi 3% (ok. 3 ml tlenu na 100 ml osocza). Taka ilość nie wystarczałaby na zaspokojenie potrzeb organizmu stałocieplnego nawet przy bardzo szybkim przepływie krwi. Związanie większej ilości tlenu nie byłoby możliwe, gdyby nie mechanizmy wykorzystujące barwnik oddechowy – **hemoglobinę** (**Hb**). Jeden litr krwi zawiera około 160 gramów hemoglobiny, które wiążą aż 200 mililitrów tlenu (każdy gram Hb wiąże ok. 1,34 ml tlenu). Jest to całkowita ilość tlenu związanego z hemoglobiną zawartą we krwi tętniczej przy jej pełnym wysyceniu.

W momencie przyłączenia tlenu do hemoglobiny powstaje tak zwana **oksyhemoglobina** (HbO_2). Oksyhemoglobina to nietrwały związek, który w tkankach ulega szybkiej dysocjacji, ponieważ oddaje związany tlen. Na proces ten wpływają cztery czynniki:

- niskie ciśnienie tlenu w tkankach (wynoszące ok. 30 mmHg)
- wyższa temperatura tkanek (zwłaszcza mięśni) w porównaniu z nabłonkiem oddechowym płuc
- wysokie ciśnienie dwutlenku węgla w tkankach
- niskie pH krwi będące konsekwencją wysokiej koncentracji dwutlenku węgla.

Po uwolnieniu tlenu do tkanek krew powraca do pierwotnego poziomu nasycenia tlenem, wynoszącego 70% maksymalnego możliwego wysycenia (tzn. wynosi 145 ml na litr krwi) **(33.3.)**.



? Przeanalizuj schemat transportu tlenu i dwutlenku węgla w płucach i tkankach.

33.3. Schemat transportu tlenu i dwutlenku węgla w płucach i tkankach

Transport dwutlenku węgla i rola hemoglobiny w procesie wymiany gazowej

Transport dwutlenku węgla z tkanek do płuc za pośrednictwem krwi wygląda nieco inaczej niż transport tlenu. Wynika to przede wszystkim z faktu, że dwutlenek węgla o wiele lepiej niż tlen rozpuszcza się w środowisku wodnym. Gdy przenika z pęcherzyków do osocza, tworzy w nim dobrze rozpuszczalne kwaśne sole: wodorowęglan potasu ($KHCO_3$) oraz wodorowęglan sodu ($NaHCO_3$), lub wiąże się z hemoglobiną w erytrocytach, w wyniku czego tworzy karbaminohemoglobinę ($HbHCO_3$).

POSTACIE DWUTLENKU WĘGLA TRANSPORTOWANE DO PŁUC

wodorowęglany	karbaminiany	rozpuszczona
85–90%	5–10%	ok. 5%

Oddychanie zewnętrzne (wymiana gazowa w płucach)

Każdy gaz obecny w powietrzu atmosferycznym ma w nim swój udział procentowy wyrażany przez tak zwane **ciśnienie parcjalne** (cząstkowe). Aby mogła zajść wymiana gazowa, musi zaistnieć różnica między ciśnieniem parcjalnym gazu w pęcherzyku płucnym a tym obecnym we krwi i w tkankach.

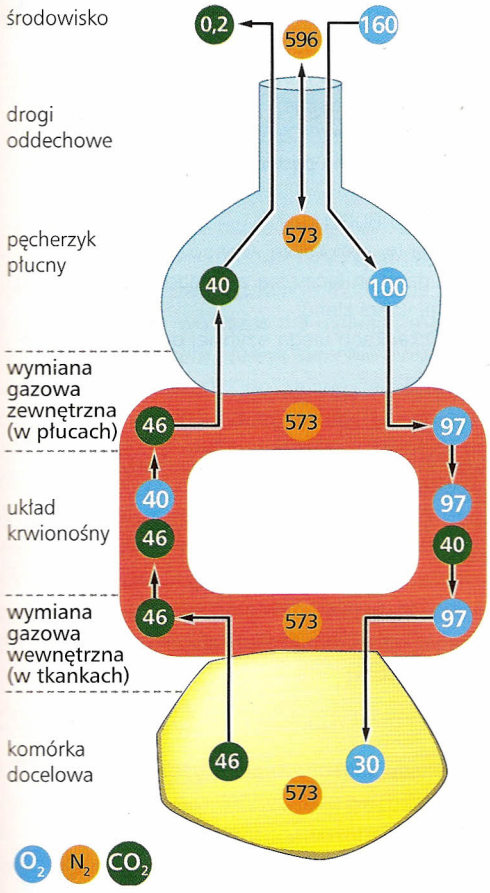
Kierunek przemieszczania się gazów wynika z prawa dyfuzji mówiącego, że cząsteczki gazu przemieszczają się zawsze zgodnie z gradientem stężeń, czyli z ośrodka o wyższym ciśnieniu parcjalnym w kierunku ośrodka o niższym ciśnieniu parcjalnym. Jest to uwarunkowane tendencją do wyrównania ciśnienia w dwóch sąsiadujących ośrodkach. Dyfuzja gazów w pęcherzykach płucnych zachodzi sprawnie dzięki niezwykle cienkiej błonie pęcherzyka i naczynia włosowatego.

Powietrze atmosferyczne zawiera około 21% tlenu, wywierającego ciśnienie parcjalne na poziomie 160 mmHg. Wdychana, świeża porcja powietrza miesza się w przestrzeni martwej układu oddechowego z obecnymi w niej gazami i parą wodną. Procentowy udział tlenu w takiej mieszance maleje, podobnie jak wywierane przez niego ciśnienie parcjalne (w pęcherzykach płucnych wynosi ono ok. 100 mmHg). W tętniczkach włosowatych oplatających pęcherzyki płucne ciśnienie parcjalne tlenu jest jeszcze mniejsze (wynosi ok. 40 mmHg). Duża różnica ciśnień między pęcherzykiem i krwią (rzędu 60 mmHg) pozwala na sprawną dyfuzję tlenu do krwinek czerwonych. Ciśnienie tlenu w pęcherzyku płucnym i krwi bardzo szybko (w czasie krótszym niż jedna sekunda) wyrównują się do poziomu 97 mmHg. Krwinki docierające do pęcherzyka płucnego są wysycone tlenem w około 70%, a po przejściu przez płuca stopień ich wysycenia wzrasta do nawet 98,5%.

:: Ciekawostka

Za produkcję surfaktantu odpowiadają pneumocyty II rzędu, będące komórkami wydzielniczymi nabłonka oddechowego płuc. Uaktywniają się one już w fazie życia płodowego (pomiędzy 28. a 32. tygodniem ciąży), a więc na długo przed tym, zanim pęcherzyki płucne zaczną pełnić swą funkcję. U wcześniaków może wystąpić zagrażająca życiu niewydolność oddechowa, ponieważ niedostateczna ilość surfaktantu powoduje zapadanie się pęcherzyków płucnych, a to znacznie upośledza zdolności oddechowe dziecka. Aby temu zapobiec, kobiety ciężarne powinny przed porodem zażywać preparaty zawierające glikokortykosteroidy, które przyspieszają wytwarzanie surfaktantu.

Ciśnienie parcjalne dwutlenku węgla we krwi docierającej do pęcherzyka (wynoszące ok. 46 mmHg) jest niewiele większe niż ciśnienie CO_2 wewnątrz pęcherzyka. Ta nieduża różnica (rzędu 6 mmHg) pozwala jednak na dyfuzję gazu z krwi do światła pęcherzyka. Dzieje się tak, ponieważ dwutlenek węgla jest o wiele lepiej rozpuszczalny w wodzie niż tlen i jego przepływ między dwoma ośrodkami zachodzi bardzo sprawnie mimo małej różnicy ciśnień.



33.4. Schemat transportu gazów oddechowych w ciele człowieka z uwzględnieniem ich ciśnień parcjalnych (w mmHg)

? Dlaczego dla sprawnego przepływu gazów oddechowych konieczna jest różnica ich ciśnień?

Trzeci ważny składnik powietrza, azot, w pęcherzykach płucnych osiąga ciśnienie parcjalne identyczne jak ciśnienie tego gazu w osoczu. Nie ulega on zatem wymianie gazowej.

:: Ciekawostka

Stosowane w szpitalach pulsoksymetry służą do nieinwazyjnego pomiaru stopnia utlenowania krwi (czyli stopnia tzw. saturacji). Są to proste w obsłudze czujniki, które umieszcza się na palcu, skrzydełku nosa lub płatku ucha. Pozwalają one określić zawartość hemoglobiny utlenowanej we krwi (cechuje się ona odmienną od hemoglobiny nieutlenowanej absorpcją promieniowania). Na podstawie pomiaru możliwe jest wyliczenie procentowej zawartości hemoglobiny utlenowanej, wynoszącej u zdrowego człowieka od 97% do 98,5%.



:: Ciekawostka

Choroba dekompresyjna (zwana chorobą kesonową) najczęściej występuje u nurków, którzy są narażeni na gwałtowną zmianę ciśnienia z wysokiego (panującego pod wodą) na niskie (atmosferyczne). W czasie szybkiego wynurzania obecny we krwi i tkankach azot zostaje uwolniony w postaci pęcherzyków. Mogą one prowadzić do uszkodzenia tkanek, czego objawami są świąd i marmurkowatość powłok skórnych. W skrajnych wypadkach może dojść do martwicy kości, uszkodzenia układu nerwowego, a nawet śmierci. Osoby cierpiące na chorobę kesonową muszą zostać poddane dekompresji. Przeprowadza się ją w komorze ciśnieniowej (dekompresyjnej), w której ciśnienie jest zmniejszane stopniowo. Umożliwia to usunięcie nadmiaru azotu z krwi w sposób niezagrażający organizmowi.

Wymiana gazowa wewnętrzna

Opisane powyżej oddychanie zewnętrzne polega na wymianie gazowej pomiędzy powietrzem atmosferycznym, wypełniającym pęcherzyki płucne, a krwią. Gdy bogata w tlen krew dociera do tkanek docelowych, następuje proces odwrotny do zachodzącego w płucach, a polegający na odłączeniu tlenu od oksyhemoglobiny. Ciśnienie cząstkowe tlenu w naczyniach włosowatych wynosi 97 mmHg, a wewnątrz komórek – zaledwie 30 mmHg **(33.4.)**. Ta wyraźna różnica ciśnień (rzędu 67 mmHg) powoduje łatwe i szybkie przenikanie tlenu do komórek. Równocześnie dwutlenek węgla przenika z komórek do krwi, gdzie jego ciśnienie rośnie z 40 mmHg do 46 mmHg.

PODSUMOWANIE

- Pracę wykonywaną przez układ oddechowy dzieli się na dwie fazy: wdechu oraz wydechu.
- W fazie wdechu aktywny udział biorą przepona oraz mięśnie międzyżebrowe zewnętrzne.
- W wyniku skurczu przepona spłaszcza się w kierunku jamy brzusznej, przez co powiększa się objętość jamy klatki piersiowej.
- Zwiększenie objętości klatki piersiowej prowadzi do wytworzenia podciśnienia, umożliwiającego napływ powietrza do płuc.
- Całkowita objętość płuc dorosłego człowieka wynosi około 6000 cm^3.
- Tlen jest gazem o niewielkiej rozpuszczalności w wodzie (w tym także w osoczu). Dlatego w toku ewolucji wykształcił się mechanizm, w którym gaz ten łączy się z hemoglobiną zawartą w erytrocytach. Pozwala to na transport odpowiedniej ilości tlenu.
- Oksyhemoglobina jest nietrwałym związkiem, który w tkankach ulega szybkiej dysocjacji: oddaje związany tlen.

ZADANIA

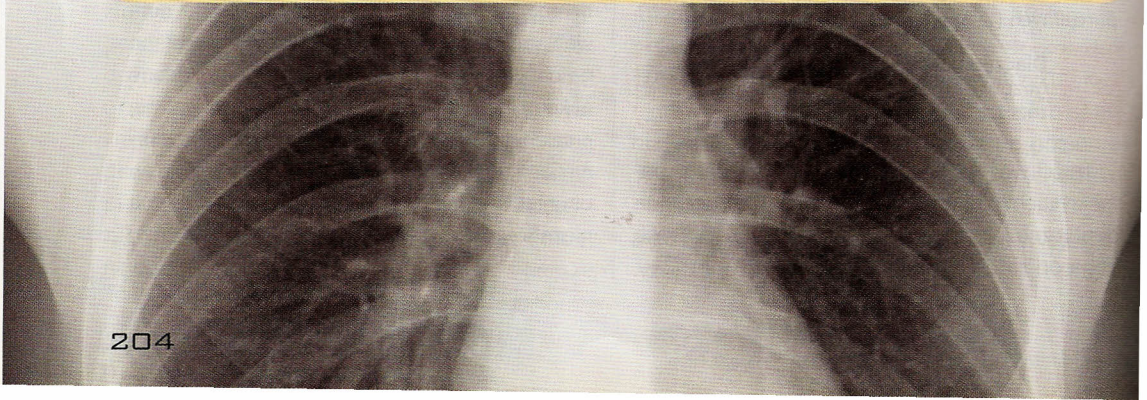
1. Wyjaśnij mechanizm wdechu i wydechu u człowieka oraz określ, który z wymienionych etapów oddychania jest procesem czynnym, a który – biernym.
2. Scharakteryzuj rolę i mechanizm działania przepony oraz mięśni międzyżebrowych zewnętrznych i wewnętrznych w czasie wdechu i wydechu.
3. Omów rolę tłoczni brzusznej.
4. Porównaj objętość całkowitą płuc z pojemnością życiową płuc.
5. Porównaj sposoby transportu tlenu i dwutlenku węgla we krwi, uwzględniając rozpuszczalność tych gazów oraz mechanizmy ich chemicznego wiązania.

BIBLIOGRAFIA

- Doboszyńska A., Wrotek K., *Badania czynnościowe układu oddechowego*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2004.

W INTERNECIE

- http://www.medisa.pl/wymiana_tlenu_dwutlenku_wegla.html
- http://www.twoje-zdrowie.com.pl/anatomia/ukady/65-ukad-oddechowy.html



34. Zaburzenia funkcjonowania układu oddechowego

Układ oddechowy odgrywa ważną rolę w życiu organizmu, ponieważ dostarcza do tkanek życiodajny **tlen** i odprowadza z nich toksyczny **dwutlenek węgla**. Pośredniczy między organizmem a środowiskiem, dlatego stale jest narażony na działanie różnego typu czynników zewnętrznych, nierzadko szkodliwych. Zaburzenie lub czasowe ustanie pracy układu oddechowego może mieć tragiczne konsekwencje. Gdy dopływ tlenu zostanie zahamowany na dłużej niż pięć minut, dochodzi do śmierci w związku z trwałym uszkodzeniu mózgu.

Pierwszy oddech

Uważa się, że najbardziej krytycznym momentem w życiu człowieka jest pierwszy wdech, wykonywany w chwili narodzin. Po przecięciu pępowiny noworodek zostaje nagle odcięty od łożyska, czyli narządu wymiany gazowej funkcjonującego przez cały okres życia płodowego. Ponieważ płuca dziecka jeszcze wówczas nie działają, maleje wysycenie krwi tlenem i rośnie stężenie dwutlenku węgla, co prowadzi do zakwaszenia krwi. To sygnał dla ośrodka oddechowego w rdzeniu przedłużonym, by uruchomić proces wentylacji płuc. Skurcz przepony i mięśni międzyżebrowych wytwarza podciśnienie, które prowadzi do napełnienia powietrzem płuc noworodka po raz pierwszy w życiu. Uderzenie płuc o powierzchnię opłucnej jest bardzo bolesne. Dziecko reaguje na ból płaczem, co wymaga dużej intensywności wdechów i szybko prowadzi do uzupełnienia niedoborów tlenu. W wyniku pierwszego wdechu w płucach i wszystkich przewodach, które do nich prowadzą, pojawia się naturalna mikroflora (a zatem układ oddechowy przestaje być miejscem sterylnym). W napełnionych powietrzem płucach pojawia się także objętość zalegająca, pozostająca w nich aż do śmierci organizmu.

:: Ciekawostka

Gdy noworodek przez dłuższy czas nie podejmuje akcji oddechowej, osoba przyjmująca poród może zdecydowane klepnąć dziecko w pośladek. Towarzyszący temu ból wywołuje płacz, do którego niezbędne jest zaczerpnięcie powietrza.

Zagrożenia wynikające z zanieczyszczenia środowiska

Od momentu narodzin układ oddechowy działa w sposób nieprzerwany. W związku z tym nieustannie styka się ze **szkodliwymi substancjami** różnorakiego pochodzenia (biologicznego i chemicznego). Czystość powietrza jest kluczowa dla jego sprawnego funkcjonowania. Niestety, obserwowane współcześnie i mające globalną skalę **zanieczyszczenie środowiska** w największym stopniu dotyczy powietrza (w tym zanieczyszczeń pyłowych i chemicznych). Człowiek, zwłaszcza mieszkający w dużym mieście, jest codziennie narażony na kontakt ze spalinami samochodowymi. To mieszanina dużej ilości szkodliwych gazów oraz pierwiastków, które odkładają się w drogach oddechowych i mogą być przyczyną stanowiących śmiertelne zagrożenie chorób. Jednymi z powszechnie znanych, niebezpiecznych produktów spalania paliw samochodowych są pochodne ołowiu i inne pierwiastki, na przykład rtęć oraz tlenki siarki i tlenki azotu.

Ołów jest ciężkim pierwiastkiem, dlatego jego związki nie unoszą się do górnych warstw atmosfery, lecz gromadzą się blisko powierzchni gruntu. Liczne badania wykazały, że szczególnie narażone na zatrucie związkami ołowiu są dzieci, których jama ustna (ze względu na ich niski wzrost) znajduje się na poziomie dużego zagęszczenia tych toksycznych substancji. Częste przebywanie z dziećmi w miejscach zadymionych lub o dużej koncentracji spalin samochodowych może prowadzić do rozwoju ciężkich chorób (jak astma).

Rtęć bardzo łatwo dostaje się do organizmu przez układ oddechowy. Toksyczność rtęci polega na uszkadzaniu błon biologicznych, łączeniu się z białkami, co zaburza wiele procesów biochemicznych ustroju. Zatrucie parami rtęci powoduje znaczną niewydolność oddechową płuc oraz uszkodzenia nerek i ośrodkowego układu nerwowego.

Palenie tytoniu

Jednym z największych zagrożeń dla układu oddechowego jest **palenie tytoniu**. W dymie papierosowym znajduje się blisko 4000 substancji, które prowadzą do uszkodzenia płuc (34.1.). Problemy związane z nałogiem palenia szerzej opisano w rozdziale poświęconym zaburzeniom homeostazy (por. rozdz. 24). Poniżej przedstawiono jedynie poważne schorzenia będące skutkiem palenia. Są to **rak płuc** oraz **przewlekła obturacyjna choroba płuc** (**POChP**).

Rak płuc

W wyniku kontaktu szkodliwych substancji zawartych w dymie papierosowym z nabłonkiem oddechowym płuc dochodzi do mutacji w genomach budujących go komórek. Na skutek tego przestają one funkcjonować jako komórki nabłonka oddechowego i zaczynają się dzielić w niekontrolowany sposób. Uzyskują również zdolność przeciwdziałania mechanizmom prowadzącym do samobójczej śmierci komórki (apoptozy). W efekcie dochodzi do rozwoju **nowotworu** (34.2.), który (o ile nie zostanie wykryty wystarczająco wcześnie) cechuje się bardzo wysoką śmiertelnością.

Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO), palenie papierosów jest jedną z głównych przyczyn **raka płuc** (71% przypadków) oraz nowotworów innego typu (22% przypadków). Duże ryzyko stwarza nawet przebywanie w towarzystwie osób palących, czyli tzw. bierne palenie. Statystycznie, co roku na raka płuc umiera 1,37 miliona osób (w 2030 roku ma to być już 13,1 mln). Dowodzi to, że rokowania w przypadku tego typu nowotworu są złe (w razie późnego wykrycia mniej niż 10% pacjentów przeżywa pięć lat). Do rozwoju raka płuc przyczyniają się nie tylko palenie papierosów, lecz także inne substancje (kancerogeny). Należą do nich: **azbest**, **arsen**, **chrom**, **radon**. Na rozwój raka płuc wpływają również czynniki dziedziczne. W leczeniu stosuje się głównie zabieg operacyjny polegający na wycięciu całego płata płuca, w którym zlokalizowano guz. Ryzyko powstania przerzutów jest minimalizowane przez zabiegi **chemioterapii** i **radioterapii**.

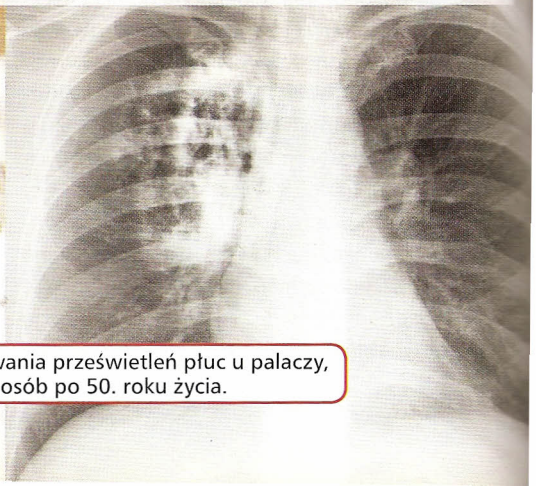
Przewlekła obturacyjna choroba płuc (POChP)

POChP jest skutkiem długotrwałego narażenia na czynniki drażniące w postaci pyłów czy dymu (np. pochodzącego z papierosów, cygar oraz fajek). W jej przebiegu w tkance płucnej pojawia się reakcja zapalna, będąca odpowiedzią organizmu na szkodliwe substancje przedostające się do płuc drogą wziewną. Powoduje ona uszkodzenia tkanki płucnej, rozedmę płuc oraz przewlekłe zapalenie oskrzeli. Prowadzi to do znaczącego upośledzenia

34.1. Płuca palacza



34.2. Zdjęcie rentgenowskie przedstawiające rozwijający się nowotwór płuca (prawego)



? Wykaż słuszność wykonywania prześwietleń płuc u palaczy, pracowników kopalń oraz osób po 50. roku życia.

wymiany gazowej. Typowym objawem POChP są duszności, które początkowo pojawiają się w czasie wysiłku, a z czasem – również w czasie spoczynku. Choroba ta jest nieuleczalna (zaistniałe uszkodzenia są trwałe), ale stosowane współcześnie terapie mogą powstrzymać jej postęp. Sukces leczenia POChP w znacznym stopniu zależy od momentu wykrycia, a niepodjęcie terapii lub jej przerwanie zawsze mają tragiczny finał i kończą się śmiercią.

Spirometria

Jedną z najskuteczniejszych metod wykrywania chorób układu oddechowego (zwłaszcza POChP) jest badanie **spirometryczne**. Przypomina ono badanie policyjnym alkomatem. Po zatkaniu nosa i wykonaniu serii swobodnych oddechów pacjent jest proszony o wykonanie maksymalnego wdechu, a następnie – maksymalnego wydechu. Na końcu przeprowadza się pomiar swobodnego wydechu po poprzedzającym go maksymalnym wdechu. Za pomocą spirometru można określić, jaka jest pojemność płuc oraz oskrzeli, a tym samym ocenić ich kondycję. Wyniki badania mogą prowadzić do rozpoznania typowych zaburzeń czynnościowych płuc, do których należą obturacja i restrykcja.

Obturacja objawia się ciągłym zaleganiem nadmiernej ilości śluzu w kanałach powietrznych płuc, w wyniku czego zmniejsza się światło tych kanałów. Powoduje to problemy z wykonaniem pełnego wydechu, co znacznie zmniejsza całkowitą wydolność oddechową. Obturacja pozwala podejrzewać przede wszystkim POChP oraz astmę.

Restrykcja polega na zmniejszeniu poniżej normy objętości płuc uczestniczącej w wymianie gazowej. Jest skutkiem operacyjnego usunięcia płata płuca lub zniszczenia fragmentu płuca (np. w wyniku rozwoju choroby nowotworowej). Występuje również w zaawansowanym stadium POChP.

Infekcje dróg oddechowych

Jedną z najczęstszych przyczyn zaburzających funkcjonowanie układu oddechowego są **infekcje dróg oddechowych**. Wraz z wdychanym powietrzem (drogą wziewną) do ich wnętrza dostają się różnego typu mikroorganizmy (bakterie, wirusy, grzyby). Drobnoustroje przytwierdzają się do błony śluzowej i, o ile nie zostaną szybko zniszczone przez komórki układu odpornościowego, zaczynają się namnażać. W konsekwencji rozwija się stan zapalny, który upośledza czynności układu oddechowego.

Katar (czyli **nieżyt błony śluzowej nosa**) to jedna z najczęstszych infekcji dróg oddechowych. Wynika to z faktu, że jama nosowa nieustannie jest narażona na kontakt z drobnoustrojami. Najważniejszymi przyczynami kataru są **reakcje alergiczne** oraz **infekcje**. W pierwszym przypadku choroba rozwija się w odpowiedzi na alergeny (najczęściej są to pyłki roślin, sierść zwierząt, roztocza kurzu domowego). Nieżyt nosa o podłożu infekcyjnym jest na ogół powodowany przez tak zwane rhinowirusy. Zarówno reakcja alergiczna, jak i infekcja wirusowa prowadzą do obrzęku śluzówki nosa i zwiększenia przepuszczalności obecnych w niej naczyń krwionośnych. Powoduje to pojawienie się wodnistej wydzieliny charakterystycznej dla kataru. Stan zapalny błony śluzowej nosa powodowany infekcją wirusową trwa zazwyczaj 5–7 dni. Reakcje alergiczne mają charakter sezonowy (występują w okresach zwiększonej ekspozycji na alergen).

Zapalenie gardła jest najczęściej spowodowane infekcją wirusową lub bakteryjną (rzadziej). Dzieje się tak, ponieważ w gardle krzyżują się przewód pokarmowy i drogi oddechowe. Na skutek tego jest ono nieustannie narażone na kontakt z drobnoustrojami zawartymi w pokarmach i wdychanym powietrzu. Objawy stanu zapalnego gardła to: zaczerwienienie i obrzęk błony śluzowej oraz ból nasilający się w czasie połykania. W wypadku infekcji bakteryjnej stwierdza się też obecność nalotów w gardle i migdałkach, gorączkę oraz znaczne powiększenie węzłów chłonnych.

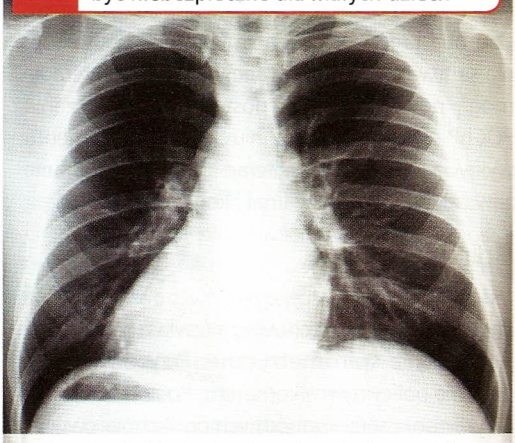
Zapalenie krtani, podobnie jak katar i zapalenie gardła, w głównej mierze jest wywoływane przez wirusy. Jego objawy to: kaszel, chrypka, drapanie w gardle oraz gorączka i dreszcze (znacznie rzadziej). W krtani znajdują się struny głosowe, dlatego też często objawem stanu zapalnego tego odcinka układu oddechowego jest częściowa utrata głosu. W leczeniu zapalenia krtani stosuje się inhalacje z pary wodnej, leki rozrzedzające wydzielinę, a w wypadku powikłań związanych z nadkażeniem bakteryjnym również antybiotyki.

Zapalenie płuc (34.3.) to dość powszechne schorzenie układu oddechowego wywoływane najczęściej przez **dwoinki zapalenia płuc** (*Diplococcus pneumoniae*). Bywa też, że zapalenie płuc wywołują wirusy lub grzyby. Jego objawami są: znaczący spadek wydolności oddechowej, gorączka, bóle mięśni oraz dreszcze. Zanim wynaleziono antybiotyki, zapalenie płuc bardzo często kończyło się śmiercią (zwłaszcza dzieci i osób starszych). Choroby tej nie należy lekceważyć, ponieważ ma ona ciężki przebieg i może prowadzić do licznych powikłań. Zawsze wymaga opieki lekarskiej, a niekiedy – hospitalizacji.

Zapalenie oskrzeli to stan zapalny błony śluzowej oskrzeli. Na ogół wywołuje go infekcja wirusowa, która powoduje przekrwienie i złuszczanie się nabłonka oddechowego. Na skutek tego w oskrzelach pojawia się płyn wysiękowy blokujący przepływ powietrza. Objawy to najczęściej: kaszel, katar, ból gardła, „furkoczący" oddech oraz uczucie duszności. Leczenie zapalenia oskrzeli powinno być dostosowane do rodzaju czynnika, który je wywołał. Wyleczona choroba na ogół nie wiąże się z ciężkimi powikłaniami.

Gruźlica płuc jest wywoływana przez **prątki gruźlicy** (*Mycobacterium tuberculosis*), atakujące głównie narządy oddechowe (w 90% przypadków). Nie jest to spowodowane szczególną specyficznością prątków, lecz tym, że najczęściej przedostają się one do organizmu drogą wziewną. Gdy dotrą do płuc, wywołują infekcję niebezpieczną i trudną w leczeniu. Choroba rozwija się powoli i zanim ujawni się w postaci objawów klinicznych, powoduje znaczne zniszczenie tkanki

? Dlaczego nieleczone zapalenie płuc może być niebezpieczne dla małych dzieci?

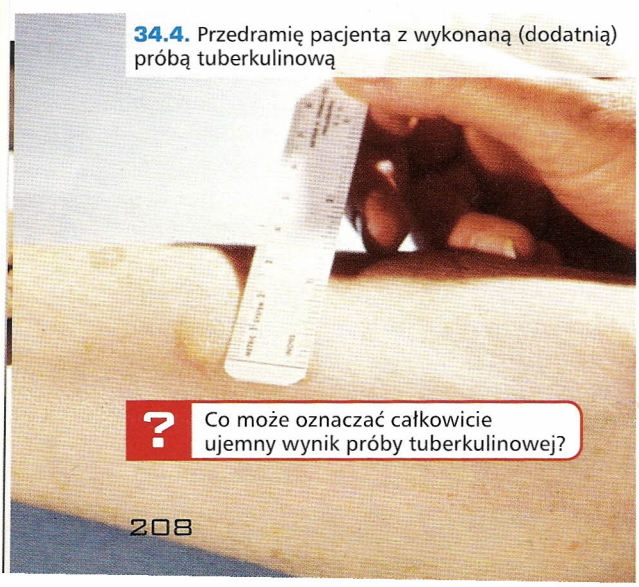


34.3. Zdjęcie klatki piersiowej, na którym widać stan zapalny obejmujący dolny płat prawego płuca.

oddechowej płuc. Objawami infekcji gruźliczej są: ból w klatce piersiowej, intensywny kaszel, krwioplucie, gorączka, dreszcze oraz wyraźny ubytek masy ciała (stąd dawna nazwa gruźlicy – suchoty). W zapobieganiu gruźlicy stosuje się szczepienia profilaktyczne, które nie gwarantują jednak całkowitej ochrony przez zachorowaniem.

Gruźlicę rozpoznaje się na podstawie zdjęcia rentgenowskiego klatki piersiowej. Zakażenie prątkami można również potwierdzić, jeżeli wykona się **próbę tuberkulinową** (34.4.). To test polegający na śródskórnym wstrzyknięciu niewielkiej dawki tuberkuliny (oczyszczonego białka uzyskanego z hodowli prątków gruźlicy). Po 72 godzinach odczytuje się średnicę nacieku w miejscu wstrzyknięcia, który potwierdza obecność we krwi przeciwciał przeciwprątkowych. Wysoce dodatnia próba tuberkulinowa może świadczyć o toczącej się w organizmie infekcji wywołanej przez prątki, musi jednak zostać potwierdzona innymi badaniami ze względu na pojawiające się niekiedy wyniki fałszywie dodatnie.

Leczenie gruźlicy trwa bardzo długo (6–9 miesięcy) i polega na terapii skojarzonej (stosuje się kombinację kilku antybiotyków). Po zakończeniu terapii i ustąpieniu objawów istnieje duże ryzyko nawrotu choroby (nawet po kilkunastu latach od pierwotnego zakażenia). Jest to tak zwana gruźlica popierwotna, będąca rezultatem uaktywnienia się prątków, którym udało się przetrwać stosowaną wcześniej terapię antybiotykową.



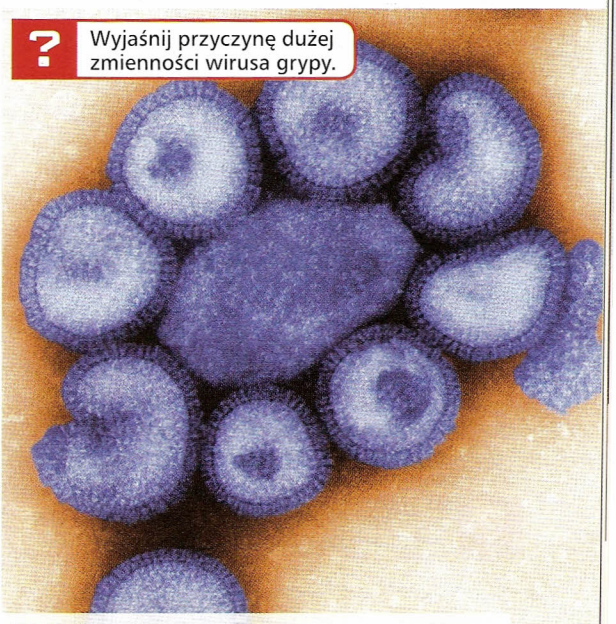
34.4. Przedramię pacjenta z wykonaną (dodatnią) próbą tuberkulinową

? Co może oznaczać całkowicie ujemny wynik próby tuberkulinowej?

Grypa jest powodowana infekcją wirusem grypy **(34.5.)**. Czynnik zakaźny przedostaje się do układu oddechowego drogą kropelkową od osoby zarażonej. U niektórych osób (zwłaszcza dzieci oraz ludzi starszych) choroba może prowadzić do groźnych powikłań lub nawet do śmierci. Objawy grypy to: wysoka gorączka, dreszcze, bóle mięśniowo-stawowe (objaw charakterystyczny), ból głowy i gardła oraz brak apetytu. Powikłania po przebytej grypie mogą prowadzić do zapalenia osierdzia i mięśnia sercowego, zapalenia mózgu, niewydolności nerek. Zapobiegawczo stosuje się szczepienia przeciwgrypowe, jednak ze względu na olbrzymią zmienność wirusa muszą one być ponawiane przed każdym sezonem zachorowań na grypę.

Mukowiscydoza jest również nazywana zwłóknieniem torbielowatym. To choroba o podłożu genetycznym, spowodowana recesywną mutacją. Białko kodowane przez wadliwy gen powoduje nadmierną produkcję lepkiego i gęstego śluzu. Usunięcie tego śluzu przez ruch rzęsek nabłonka migawkowego jest utrudnione. Zalega on w związku z tym w kanałach oddechowych i pęcherzykach płucnych, przez co drastycznie ogranicza wymianę gazową i sprzyja rozwojowi infekcji bakteryjnych wyniszczających płuca. Zniszczenia w obszarze tkanki płucnej są najczęstszą przyczyną zgonów (90–97%) osób chorych na mukowiscydozę. Ponieważ choroba ma podłoże genetyczne, nie istnieje lek, który umożliwiłby całkowite zniesienie jej szkodliwych skutków. Najlepsze rezultaty daje leczenie objawowe, bazujące na codziennej **fizjoterapii**, dzięki której duża ilość śluzu zostaje usunięta z dróg oddechowych. Równolegle stosuje się **inhalacje** oraz **leki mukolityczne**, które zmieniają właściwości śluzu produkowanego w drogach oddechowych (upłynniają go). Ze względu na częste infekcje dróg oddechowych stosuje się również antybiotyki, co ma zapobiegać uszkadzaniu płuc przez drobnoustroje.

? Wyjaśnij przyczynę dużej zmienności wirusa grypy.



34.5. Wirus grypy

:: Ciekawostka

Według obiegowej opinii mukowiscydoza jest chorobą, która występuje rzadko. Jednak w Polsce jedna na 25 osób jest nosicielem uszkodzonego genu, zatem prawdopodobieństwo wystąpienia dwóch takich genów u dziecka jest całkiem wysokie. Jak dotąd odkryto blisko 1,5 tysiąca mutacji w obrębie genu odpowiedzialnego za tę chorobę. Dlatego u osób cierpiących na mukowiscydozę objawy chorobowe rzadko odznaczają się takim samym nasileniem.

Zatrucia tlenkiem węgla

Tlenek węgla (CO, popularnie określany jako czad) jest gazem bezwonnym i bezbarwnym. Powstaje najczęściej w trakcie pożarów jako produkt niecałkowitego spalania węgla, drewna lub tworzyw sztucznych. Do organizmu dostaje się wyłącznie poprzez drogi oddechowe. Po przeniknięciu ścianek pęcherzyków płucnych wiąże się z zawartym w hemoglobinie żelazem, tworząc karboksyhemoglobinę (HbCO). Reakcja wiązania tlenku węgla z hemoglobiną zachodzi znacznie szybciej niż z tlenem, a samo wiązanie jest wielokrotnie trwalsze. Hemoglobina jest w związku z tym unieczynniana i nie może transportować tlenu. W wyniku tego już przy niewielkich stężeniach tlenku węgla dochodzi do zagrażającego życiu niedotlenienia tkanek.

Alergie układu oddechowego

Alergia (inaczej: nadwrażliwość) to reakcja organizmu wywołana nieadekwatnym do potrzeb zaangażowaniem układu immunologicznego w zwalczanie niegroźnych czynników. Nawracające i silne reakcje alergiczne mogą z czasem doprowadzić do rozwoju **astmy**. W jej przebiegu dochodzi do trwałego zwężenia światła oskrzeli, które może nasilać się przy kontakcie z czynnikiem uczulającym (np. pyłkiem roślin, kurzem, sierścią zwierząt). Objawy ataku astmy to duszność oraz sinienie twarzy wywołane niedotlenieniem. Mogą one utrzymywać się od kilkunastu minut do kilku godzin. W leczeniu stosuje się środki rozkurczające oskrzela **(34.6.)**.



34.6. Astmatycy muszą w razie ataku choroby zażywać wziewne leki zmniejszające obrzęk oskrzeli.

? Dlaczego najwięcej osób zapada na astmę w krajach wysoko uprzemysłowionych?

PODSUMOWANIE

- Jednym z największych zagrożeń dla prawidłowego funkcjonowania układu oddechowego jest palenie tytoniu.
- Palenie tytoniu może prowadzić do rozwoju raka płuc oraz przewlekłej obturacyjnej choroby płuc (POChP).
- Stan płuc ocenia się za pomocą obrazowania rentgenowskiego klatki piersiowej oraz badania spirometrycznego.
- Ważnym czynnikiem prowadzącym do zaburzeń funkcjonowania układu oddechowego są infekcje wywoływane przez drobnoustroje.
- Do najczęstszych chorób zakaźnych układu oddechowego należą: katar, stany zapalne gardła, krtani, oskrzeli i płuc, a także gruźlica i grypa.
- Do pozainfekcyjnych chorób układu oddechowego należą mukowiscydoza oraz alergie (będące efektem nadwrażliwości na określony czynnik).

ZADANIA

1. Wyjaśnij różnicę między obturacją a restrykcją.
2. Podaj powody, dla których u osób cierpiących na mukowiscydozę prowadzi się intensywną fizjoterapię.
3. Porównaj objawy zapalenia płuc i zapalenia oskrzeli.
4. Oceń słuszność stosowania antybiotyków jako leku z wyboru u osób zgłaszających się do lekarza z podejrzeniem zapalenia oskrzeli.
5. Omów czynniki sprzyjające rozwojowi raka płuc.
6. Oceń konieczność prowadzenia badań diagnostycznych w kierunku wykrycia POChP.

BIBLIOGRAFIA

- Terelak J., *Człowiek i stres – koncepcje, źródła, reakcje, radzenie sobie, modyfikatory*, Oficyna Wydawnicza Branta, Warszawa–Bydgoszcz 2008.

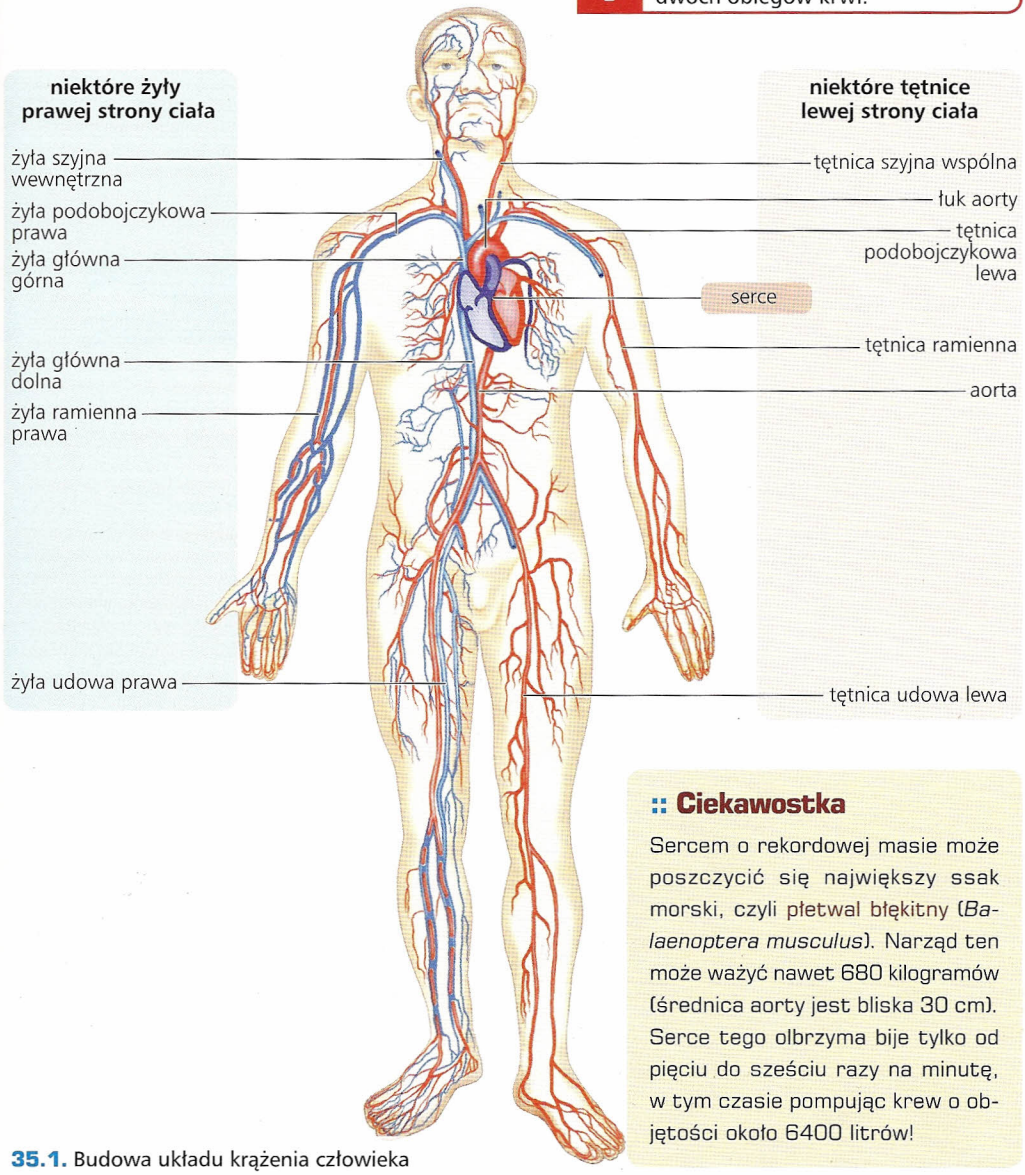
W INTERNECIE

- http://www.mukowiscydoza.net.pl/index.php

35. Budowa układu krwionośnego

W każdym organizmie wielokomórkowym istnieje konieczność transportowania różnego typu substancji, niekiedy między bardzo odległymi rejonami ciała. U zwierząt odbywa się to za pośrednictwem **układu krwionośnego** (35.1.). Krążąca w nim krew doskonale wpisuje się w definicję tkanki łącznej: zapewnia łączność poszczególnym częściom organizmu. Układ krwionośny ściśle współpracuje z układem oddechowym (transportując gazy oddechowe), pokarmowym (dostarczając substancje odżywcze wchłonięte w jelitach) oraz wydalniczym (usuwając produkty przemiany materii). **Krew** transportuje również hormony produkowane przez układ dokrewny i regulujące pracę całego ustroju.

? Wyjaśnij znaczenie wykształcenia się dwóch obiegów krwi.



35.1. Budowa układu krążenia człowieka

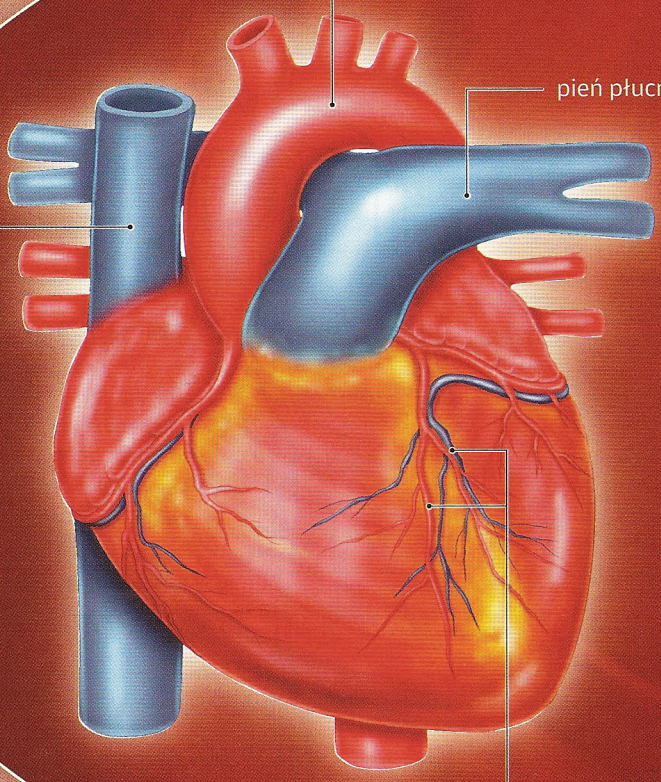
:: Ciekawostka

Sercem o rekordowej masie może poszczycić się największy ssak morski, czyli płetwal błękitny (*Balaenoptera musculus*). Narząd ten może ważyć nawet 680 kilogramów (średnica aorty jest bliska 30 cm). Serce tego olbrzyma bije tylko od pięciu do sześciu razy na minutę, w tym czasie pompując krew o objętości około 6400 litrów!

BUDOWA SERCA

Serce człowieka to masywny mięsień stożkowatego kształtu położony w śródpiersiu (pomiędzy płucami, tuż za mostkiem). Wielkość serca danej osoby w przybliżeniu jest równa wielkości jej zaciśniętej pięści, a jego masa wynosi około 300 gramów. Stanowi ono centralny element układu krążenia, pełniąc rolę pompy napędzającej przepływ krwi w naczyniach krwionośnych.
Pod względem anatomicznym serce ssaków (w tym człowieka) zbudowane jest z czterech jam, wśród których wyróżnia się dwa przedsionki i dwie komory. Przestrzenie te są od siebie oddzielone: przedsionki – przegrodą międzyprzedsionkową, a komory – przegrodą międzykomorową. Dzięki temu lewa część serca (tętnicza) jest trwale odseparowana od prawej części (żylnej).

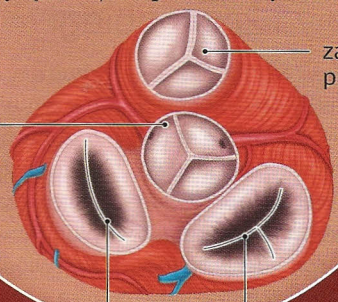
Charakterystyczną cechą anatomiczną serca jest jego tkanka mięśniowa, zbudowana z cienkich i rozgałęzionych miocytów (włókien mięśniowych). Z zewnątrz serce otacza zbudowany z tkanki łącznej włóknistej **worek osierdziowy**. Zadania worka osierdziowego to ochrona mechaniczna serca oraz zmniejszanie jego tarcia o sąsiednie narządy w czasie pracy.

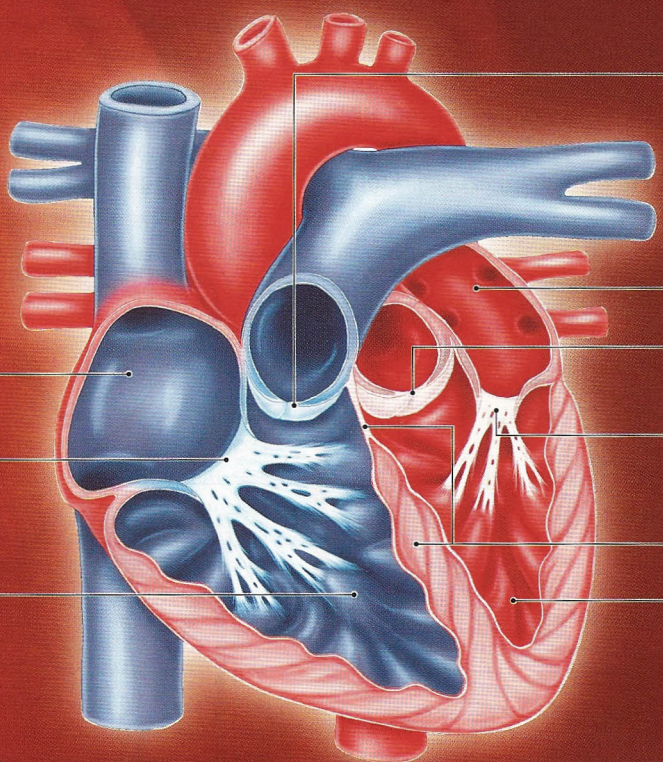


Masa mięśnia sercowego człowieka wynosi około 0,5% masy całego organizmu. Mięsień ten ma różną grubość ścian w zależności od tego, w skład jakiej części serca wchodzi. Przedsionki są znacznie cieńsze niż komory. Najgrubszą warstwę mięśniową ma lewa komora serca, podczas gdy prawa komora jest trzykrotnie cieńsza. Do każdego przedsionka wnikają naczynia żylne prowadzące krew do serca. W przedsionku prawym są to dwie żyły główne (czcze): górna i dolna. Do przedsionka lewego uchodzą natomiast żyły płucne. Z każdej komory wychodzą naczynia tętnicze prowadzące krew od serca. Z komory prawej uchodzi pień płucny, zwany tętnicą płucną, wiodący krew odtlenowaną. Ze znacznie grubszej komory lewej wychodzi największe naczynie tętnicze, czyli **aorta**, która rozprowadza krew bogatą w tlen po całym ustroju.

? Przeanalizuj budowę serca człowieka.

U podstawy pnia płucnego i aorty znajdują się **zastawki półksiężycowate** (każda zbudowana z trzech płatków o półksiężycowatym kształcie). W czasie skurczu komór płatki tych zastawek otwierają się w kierunku światła tętnic, natomiast w czasie rozkurczu – domykają się, co zapobiega cofaniu się krwi do komór.





Pomiędzy przedsionkami a komorami mieszczą się zastawki przedsionkowo-komorowe, składające się z płatków. Ich zadaniem jest zapobieganie cofaniu się krwi do przedsionka. Zastawka przedsionkowo-komorowa prawa nazywana jest **trójdzielną** (składa się z trzech płatków), a zastawka przedsionkowo-komorowa lewa – **dwudzielną** (składa się z dwóch płatków).

Przez serce przepływa w ciągu minuty około 10 litrów krwi, jednak nie korzysta ono z tlenu i substancji odżywczych w niej zawartych. Są one doprowadzane do mięśnia sercowego za pośrednictwem tak zwanych **tętnic wieńcowych**, odchodzących od aorty zaraz za sercem. Po dostarczeniu substancji odżywczych oraz tlenu krew z układu wieńcowego jest zbierana żyłą wieńcową w kierunku prawego przedsionka serca.

Układ krwionośny i krwioobiegi

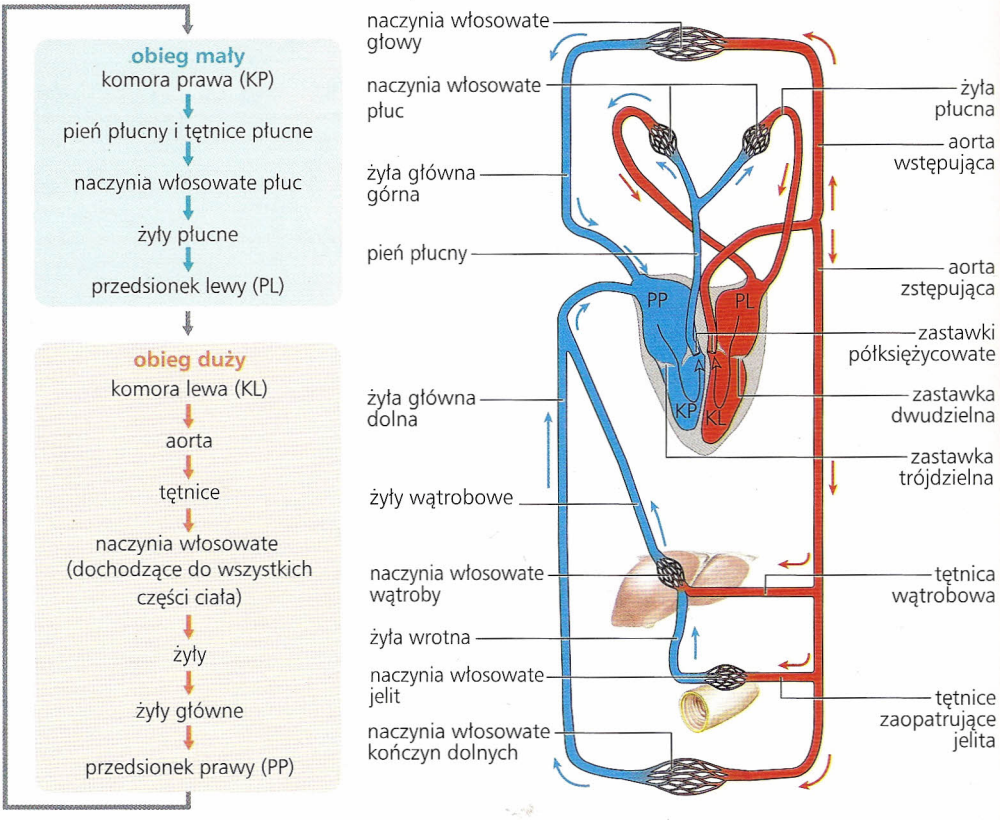
W układzie krwionośnym człowieka i innych ssaków w toku ewolucji wykształciły się dwa obiegi krwi: **obieg mały** (**płucny**) oraz **obieg duży** (**obwodowy**) **(35.2.)**. Taka budowa układu krążenia umożliwia lepsze wysycenie krwi tlenem i utrzymanie tempa metabolizmu na odpowiednio wysokim poziomie. To z kolei sprzyjało wykształceniu stałocieplności (endotermii).

Obieg mały

Obieg ten rozpoczyna się w komorze prawej, która zbiera krew żylną z prawego przedsionka. W wyniku skurczu komory krew wydostaje się do **pnia płucnego**, który tuż za sercem rozgałęzia się na dwie **tętnice płucne**. Po dotarciu do płuc rozdzielają się one na coraz drobniejsze naczynia tętnicze, ostatecznie przyjmują postać naczyń włosowatych oplatających gęstą siecią pęcherzyki płucne. Po wymianie gazowej, która zachodzi w pęcherzykach, krew utlenowana z sieci naczyń włosowatych jest odprowadzana przez drobne naczynia żylne, łączące się stopniowo w coraz grubsze żyły. Ostatecznie krew bogata w tlen wraca do lewego przedsionka serca żyłami płucnymi. Częstym błędem jest twierdzenie, że żyły wiodą wyłącznie krew odtlenowaną, a tętnice – utlenowaną. Jak widać, w obiegu małym sytuacja jest odwrotna: to żyły płucne wiodą krew bogatą w tlen, a tętnice płucne – krew odtlenowaną.

Obieg duży

Obieg ten rozpoczyna się w lewej komorze serca, z której krew bogata w tlen wydostaje się za pomocą **aorty**. Początkowo naczynie to biegnie ku górze, aby następnie wygiąć się w lewą stronę i ku tyłowi, tworząc nad sercem **lewy łuk aorty**. Później biegnie ku dołowi i po przejściu przez



35.2. Schemat układu krążenia człowieka

przeponę rozgałęzia się na dwie tętnice biodrowe, prowadzące krew do kończyn dolnych.

Niemal na każdym odcinku aorty występują liczne odgałęzienia, zaopatrujące w krew poszczególne części ciała. Pierwsze z nich znajduje się u nasady aorty, tuż za sercem. Są to **tętnice wieńcowe** dostarczające krew do mięśnia sercowego. W pobliżu szczytu łuku aorty odchodzą dwie tętnice podobojczykowe, które zaopatrują w krew kończyny górne, oraz dwie tętnice szyjne, dostarczające krew do wszystkich narządów głowy (przede wszystkim do mózgu). Niżej odchodzą tętnice, które zaopatrują w tlen narządy wewnętrzne.

Każde z odgałęzień aorty przechodzi stopniowo w tętniczki, a ostatecznie – w sieć naczyń włosowatych, oplatających docelowe narządy i tkanki. Tutaj krew oddaje tlen i substancje odżywcze, zabierając CO_2 i toksyczne produkty przemiany materii. Ponieważ maleje stopień wysycenia krwi tlenem, przybiera ona ciemniejszą barwę. W takiej postaci zostaje zebrana systemem żył, łączących się w coraz większe, i powraca do prawego przedsionka serca.

Praca serca

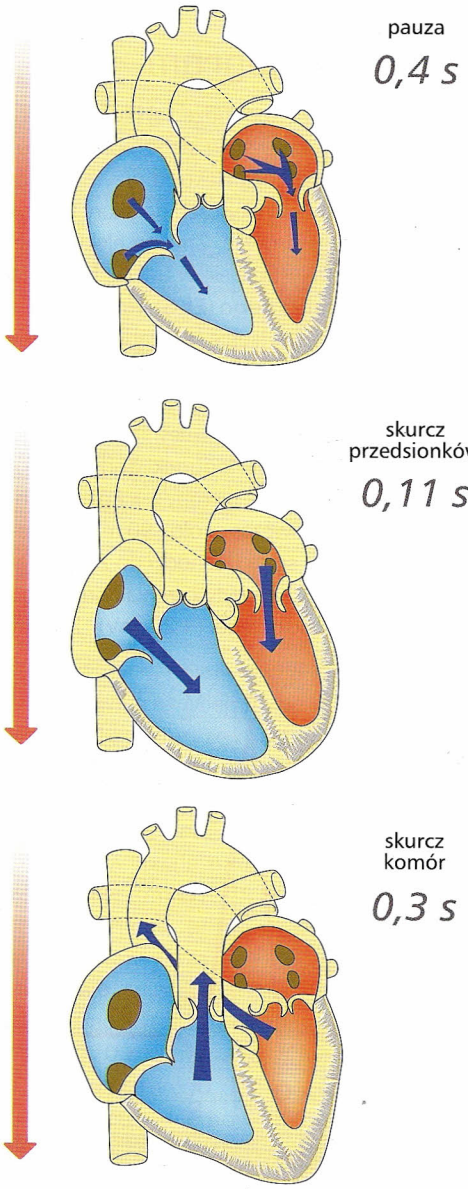
Serce zaczyna bić już około 25. dnia po zapłodnieniu i funkcjonuje nieprzerwanie aż do śmierci organizmu. Zmiany zachodzące w mięśniu sercowym w czasie jego pracy powtarzają się rytmicznie i są nazywane cyklem pracy serca. Cykl ten trwa przeciętnie w stanie spoczynku około 0,83 sekundy. W czasie jednego pełnego uderzenia serca można wyróżnić trzy fazy **(35.3.)**.

Faza I. Skurcz przedsionków następuje, gdy komory zostaną (w sposób bierny) napełnione krwią do dwóch trzecich objętości. Wówczas przedsionki zaczynają się kurczyć, wprowadzając zawartą w nich krew do odpowiadających im komór serca. W wyniku całkowitego napełnienia komór krwią znacznie wzrasta w nich ciśnienie. Zastawki przedsionkowo-komorowe są otwarte, a półksiężycowate – zamknięte. Czas trwania tej fazy to około 0,11 sekundy.

Faza II. Skurcz komór rozpoczyna się od rozkurczu przedsionków. W wyniku skurczu mięśniówki komór ciśnienie znajdującej się w nich krwi wzrasta jeszcze bardziej. Powoduje to do-

:: Ciekawostka

Powszechnie uważa się, że układ krwionośny ssaków jest układem zamkniętym. Okazuje się jednak, że w śledzionie oraz łożysku płodowym występuje krążenie otwarte. Krew z naczyń krwionośnych wylewa się do miazgi czerwonej śledziony oraz do przestrzeni międzykosmkowych łożyska. Dopiero potem jest wchłaniana do żył.



35.3. Cykl pracy serca

mknięcie się zastawek przedsionkowo-komorowych, co jest słyszalne jako **pierwszy ton serca**. Gdy wzrastające w komorach ciśnienie przekroczy wartość ciśnienia rozkurczowego krwi znajdującej się w aorcie i pniu płucnym, prowadzące do tych tętnic zastawki półksiężycowate pod wpływem naporu krwi otwierają się, umożliwiając krwi wydostanie się z serca. Czas trwania tej fazy wynosi około 0,32 sekundy.

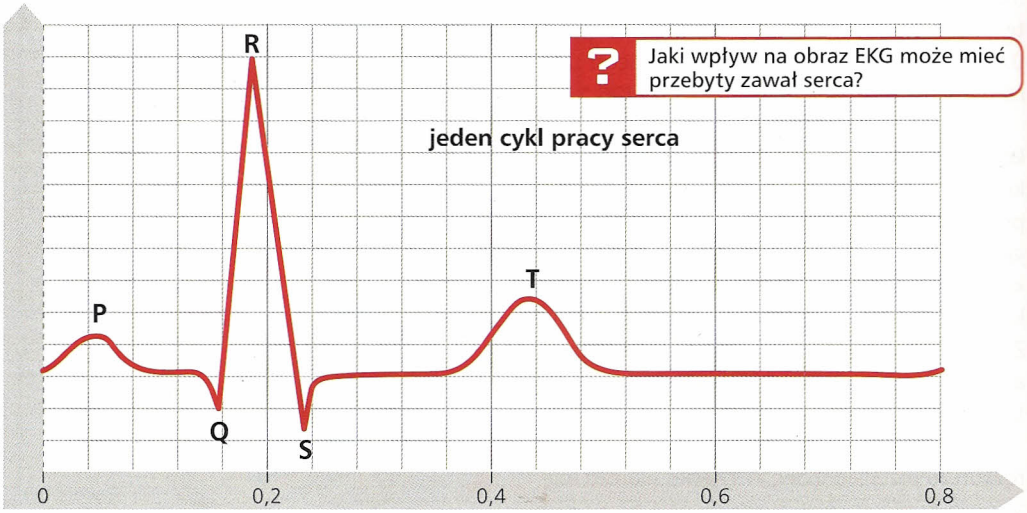
Faza III. Rozkurcz serca to faza, podczas której następuje rozkurcz komór i kontynuowany jest rozkurcz przedsionków. W wyniku spadku ciśnienia krwi w komorach poniżej ciśnienia w tętnicach wyprowadzających zamykają się zastawki półksiężycowate, co jest słyszalne jako **drugi ton serca**. Zapobiega to cofaniu się krwi z tętnic do komór. Równocześnie otwierają się zastawki przedsionkowo-komorowe. W tej fazie krew, pod bardzo niskim ciśnieniem, napływa z żył do przedsionków, a następnie – do komór. Jest to najdłuższa faza cyklu pracy serca, trwająca około 0,4 sekundy.

Elektrokardiogram

W czasie depolaryzacji (pobudzenia) i repolaryzacji mięśnia sercowego powstaje słabe pole elektromagnetyczne. Za pomocą elektrod przymocowanych w odpowiednich miejscach do skóry można je zmierzyć i zarejestrować. Zmiany elektrycznej aktywności serca rejestruje się w trakcie **badania elektrokardiograficznego** (**EKG**). Na podstawie zebranych danych urządzenie sporządza graficzny wykres czynności elektrycznej serca. Pozwala on na ocenę rytmu pracy serca w poszczególnych fazach.

Zewnętrzna część błony mięśnia sercowego w stanie spoczynku ma ładunek dodatni (+), a wnętrze serca – ładunek ujemny (–). Różnica potencjałów wynosi wówczas około –90 mV. W momencie pobudzenia serca dochodzi do zmiany ładunków, co prowadzi do wytworzenia dodatniego potencjału czynnościowego (+20 mV). Zmiany aktywności elektrycznej serca nie są jednoczesne (najpierw kurczą się przedsionki, a później – komory serca), są jednak tak silne, że mogą zostać zmierzone nawet na powierzchni skóry.

Na wykresie EKG widać wychylenia określane w terminologii międzynarodowej jako **załamki** (P, Q, R, S oraz T) **(35.4.)**. Ich pojawienie się jest spowodowane zmianami w aktywności elektrycznej poszczególnych obszarów serca. Załamek P pojawia się w momencie depolaryzacji przedsionków (czyli ich skurczu), trzy następujące po sobie załamki Q, R, S są przejawem skurczu (depolaryzacji) obu komór serca, a załamek T pojawia się w momencie repolaryzacji komór serca (czyli ich rozkurczu). Na podstawie analizy zapisu elektrokardiogramu można wiele się dowiedzieć o stanie mięśnia sercowego i jego pracy.



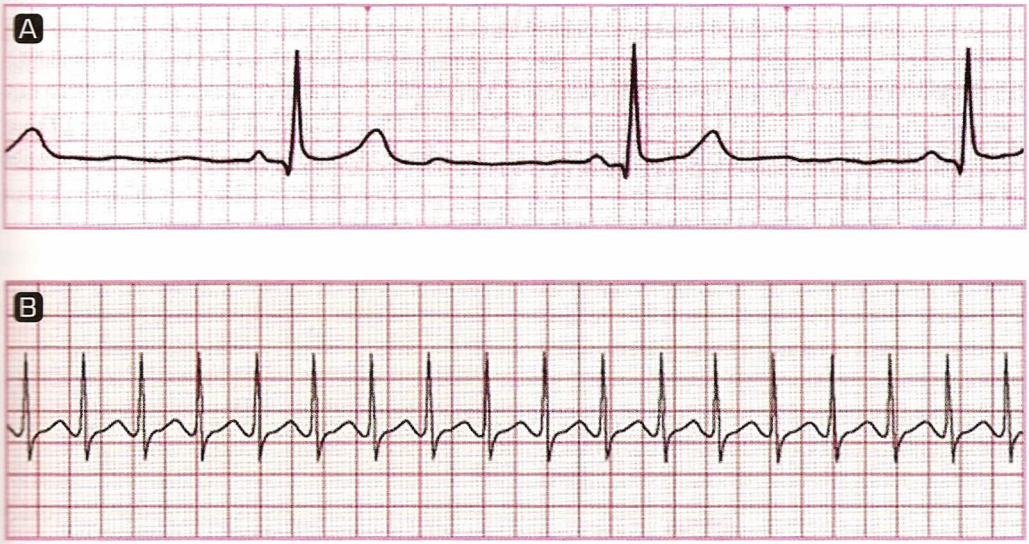
35.4. Schemat prawidłowego wykresu EKG

Zaburzenia rytmu serca

Bardzo typowymi zaburzeniami pracy serca obserwowanymi w czasie badania EKG są bradykardia i tachykardia.

Bradykardia jest stanem, w którym serce wykonuje poniżej 50 uderzeń na minutę. W wyniku spowolnionego przepływu krwi może dojść do omdlenia lub utraty przytomności. Bradykardia często występuje u osób czynnie uprawiających sport po zakończonym treningu.

Tachykardia jest stanem, w którym akcja serca przyspiesza do powyżej stu uderzeń na minutę. Nie zawsze jest objawem toczącego się procesu chorobowego (może być wynikiem wysiłku lub zdenerwowania) **(35.5.)**.



35.5. Bradykardia (A), tachykardia (B)

Pojemność serca

W wyniku skurczu serca z każdej komory zostaje wypchniętych około 80 cm^3 krwi. Jest to tak zwana **objętość wyrzutowa serca**. Serce człowieka w czasie spoczynku wykonuje około 72 uderzeń na minutę, co pomnożone przez **objętość wyrzutową** daje około 11 500 cm^3.

Pojemność minutowa serca = objętość wyrzutowa serca x **częstość akcji serca**

Jest to tak zwana **pojemność minutowa serca**. Nie ma ona wartości stałej i może wzrastać (niekiedy nawet ponad dwukrotnie) w czasie intensywnej pracy oraz silnego pobudzenia emocjonalnego. U osób, których układ krwionośny jest stale obciążony, pojemność wyrzutowa i minutowa mogą być większe (np. u zawodowych sportowców pojemność wyrzutowa serca może osiągać 200 cm^3!).

Gdy ciśnienie krwi w komorach osiągnie wartość graniczną wytrzymałości zastawek półksiężycowatych, porcja krwi przedostaje się do tętnic głównych. Miejscowe rozszerzenie się aorty jest tak silne, że rozchodzi się jako fala wzdłuż ścian naczyń do odległych regionów ciała. Jest ona wyczuwalna jako **tętno** (**puls**) i może być mierzona. Do pomiaru ciśnienia, z jakim krew działa na naczynia krwionośne, służy ciśnieniomierz. Urządzenie to podaje wartość ciśnienia w milimetrach słupa rtęci (mmHg). Najwyższą wartość ma **ciśnienie skurczowe**, występujące w czasie skurczów lewej komory (w spoczynku powinna ono wynosić 120 mmHg). Z kolei wartość **ciśnienia rozkurczowego**, które towarzyszy fazie rozkurczu serca, nie powinna przekraczać 80 mmHg. Jeśli ciśnienie skurczowe przez dłuższy czas przekracza 140 mmHg, a rozkurczowe – 90 mmHg, może to świadczyć o występowaniu nadciśnienia tętniczego.

Automatyzm pracy serca

Serce cechuje się unikatową zdolnością do samodzielnego wytwarzania bodźców powodujących skurcze mięśnia sercowego, które nie ustają nawet po wyjęciu serca z klatki piersiowej. Jeżeli obniży się temperaturę i przepuści przez serce strumień soli fizjologicznej, można utrzymać jego aktywność skurczową jeszcze przez wiele godzin. Zjawisko to nosi nazwę automatyzmu pracy serca, a zachodzi dzięki istnieniu wyspecjalizowanej tkanki nerwowej, nazywanej **układem bodźcotwórczo-przewodzącym serca** (35.6.). Powstają w niej rytmiczne bodźce przekazywane następnie do wszystkich elementów mięśnia sercowego.

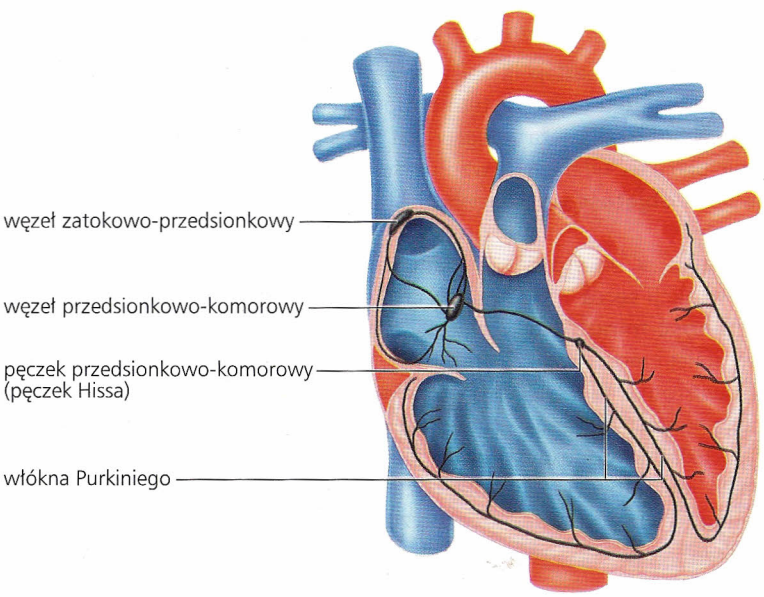
Układ odpowiadający za automatyzm pracy serca ma swój początek w okolicy ujścia żyły głównej górnej do prawego przedsionka i nosi nazwę węzła zatokowo-przedsionkowego. Miejsce to nazywane jest również **rozrusznikiem serca**, ponieważ to tutaj powstają impulsy nadające pracy serca rytm. Przekazywane są one następnie do węzła przedsionkowo-komorowego, leżącego u podstawy przegrody międzyprzedsionkowej. Z węzłem tym połączony jest pęczek przedsionkowo-komorowy (pęczek Hisa), leżący w przegrodzie międzykomorowej. Rozchodzą się od niego włókna Purkiniego, biegnące w ścianie komór.

Pobudzenie mięśnia sercowego prowadzi do skurczu przedsionków, po których następuje skurcz komór. Gdy na skutek procesu chorobowego dojdzie do zniszczenia węzła zatokowo-przedsionkowego (rozrusznika), jego funkcje przejmują leżące niżej elementy układu przewodzącego. Uniemożliwia to jednak precyzyjną kontrolę automatyzmu pracy serca, dlatego też pod skórę pacjenta bywa wszywany (czasowo lub trwale) sztuczny rozrusznik serca.

:: Ciekawostka

W toku ewolucji ssaki odziedziczyły po swoich przodkach – gadach – jeden (lewy) łuk aorty. Węzeł zatokowo-przedsionkowy jest zredukowaną pozostałością zatoki żylnej występującej w sercu gadów.

? Wskaż funkcję, jaką pełni układ bodźcotwórczo-przewodzący w sterowaniu autonomicznymi czynnościami skurczowymi serca.



35.6. Schemat budowy układu bodźcotwórczo-przewodzącego serca

Typy naczyń krwionośnych

Serce jest pompą napędzającą przepływ krwi rozprowadzanej po organizmie za pomocą wyspecjalizowanych naczyń krwionośnych. Wyróżnia się wśród nich trzy podstawowe typy: tętnice, żyły i naczynia włosowate **(35.7.)**.

Tętnice, z których największe biorą swój początek w komorach serca, odpowiadają za doprowadzanie krwi w kierunku docelowych narządów i tkanek. Krew płynie w nich pod bardzo wysokim ciśnieniem, a zatem ich ściany muszą się cechować odpowiednią grubością i wytrzymałością. Tętnice mają więc najgrubsze ściany spośród wszystkich typów naczyń, ale średnica ich światła jest mniejsza niż naczyń żylnych.

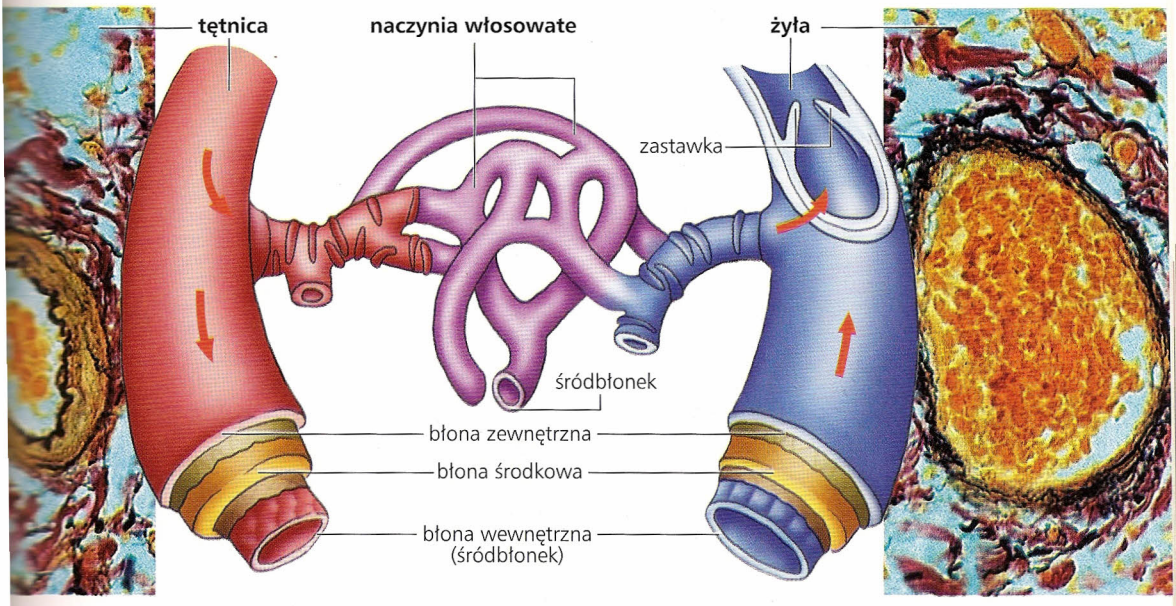
W budowie typowego naczynia tętniczego można wyróżnić trzy warstwy. Są to:

- **błona wewnętrzna**, zbudowana z nabłonka jednowarstwowego płaskiego oraz licznych włókien kolagenowych;
- **błona środkowa**, utworzona przez grubą warstwę mięśni gładkich oraz włókien złożonych z elastyny (białka odpowiadającego za elastyczność naczyń);
- **błona zewnętrzna**, zbudowana gównie z kolagenu i elastyny.

Żyły mają za zadanie transport krwi z tkanek w kierunku przedsionków serca (wyjątek stanowi żyła wrotna wątrobowa). W porównaniu do tętnic krew w żyłach płynie pod bardzo niskim ciśnieniem (przy wejściu dużych naczyń do przedsionka może ono wynosić zaledwie 5 mmHg). Niskie ciśnienie krwi w żyłach jest między innymi następstwem większej niż w tętnicach średnicy światła naczynia. Cofaniu się krwi w żyłach zapobiegają zastawki, wymuszające jej jednokierunkowy przepływ. Ściany żył są znacznie cieńsze od ścian tętnic, ale również można w nich wyróżnić trzy warstwy. Są to:

- **błona wewnętrzna**, zbudowana z nabłonka jednowarstwowego, który tworzy również zastawki;
- **błona środkowa** o wiele cieńsza niż w tętnicy i zawierająca nieliczne komórki mięśniowe (za to dużo tkanki łącznej);
- **błona zewnętrzna**, zbudowana głównie z elastyny.

Naczynia włosowate to najmniejsze i najdelikatniejsze naczynia, zbudowane z jednej warstwy śródbłonka. Ich średnica całkowita powoduje, że docierają w bezpośrednie sąsiedztwo wszystkich tkanek ciała. Cienka i łatwo przepuszczalna ściana, w którą są wyposażone, odgrywa kluczową rolę w transporcie substancji odżywczych, tlenu, dwutlenku węgla oraz szkodliwych produktów przemiany materii.



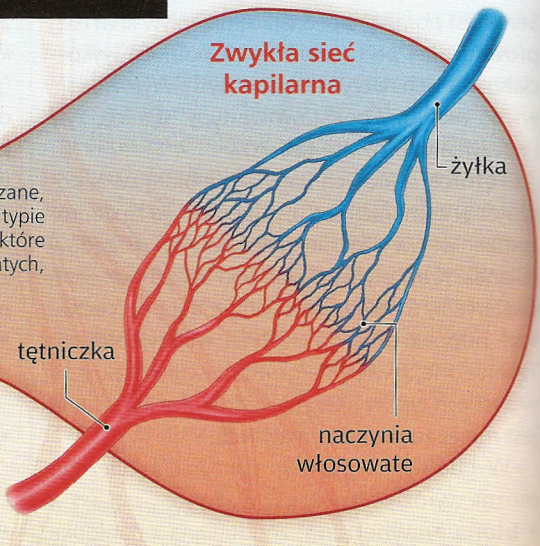
35.7. Budowa ścian naczyń krwionośnych

RODZAJE SIECI NACZYŃ KRWIONOŚNYCH

Zwykła sieć kapilarna

Naczynia krwionośne w ciele człowieka są ze sobą powiązane, tworzą funkcjonalne sieci. W najbardziej podstawowym ich typie (tzw. sieci kapilarnej) krew płynie początkowo w tętnicach, które w sąsiedztwie tkanek przekształcają się w sieć naczyń włosowatych, aby po pewnym czasie zebrać się w zbiorcze naczynie żylne.

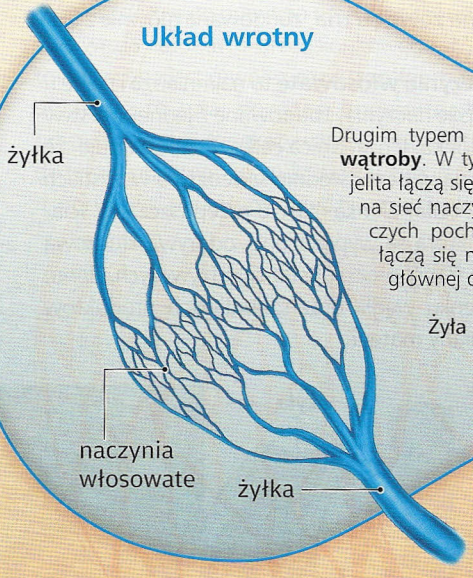
Tętnica → naczynia włosowate → żyła



Układ wrotny

Drugim typem sieci naczyń krwionośnych jest tak zwane **krążenie wrotne wątroby**. W tym wypadku liczne włosowate naczynia krwionośne opuszczające jelita łączą się we wspólną żyłę wrotną. Po dotarciu do wątroby dzieli się ona na sieć naczyń włosowatych, co umożliwia przekazanie substancji odżywczych pochodzących z jelit do komórek wątroby. Naczynia włosowate łączą się następnie w coraz większe żyły, uchodzące ostatecznie do żyły głównej dolnej.

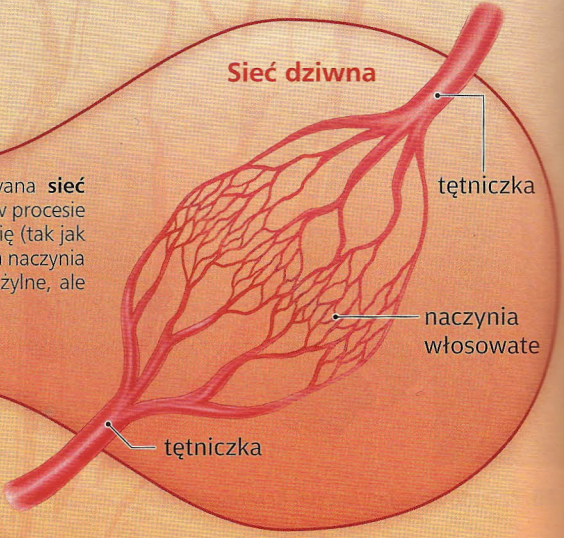
Żyła wrotna → naczynia włosowate wątroby → żyła wątrobowa



Sieć dziwna

Ostatnim typem sieci naczyń krwionośnych jest tak zwana **sieć dziwna**. Tworzą ją naczynia współdziałające z nefronem w procesie filtracji zachodzącej w nerkach. Sieć dziwna rozpoczyna się (tak jak sieć kapilarna) naczyniem tętniczym, rozgałęziającym się na naczynia włosowate. Później jednak łączą się one nie w naczynia żylne, ale ponownie w naczynia tętnicze.

Tętnica → naczynia włosowate → tętnica



PODSUMOWANIE

- Układ krwionośny ssaków (w tym człowieka) składa się z dwóch obiegów krwi: małego (płucnego) i dużego (obwodowego).
- Obieg mały rozpoczyna się w prawej komorze serca, skąd krew tłoczona jest poprzez pień płucny i tętnice płucne do naczyń włosowatych płuc, gdzie zachodzi wymiana gazowa. Krew bogata w tlen powraca do lewego przedsionka za pośrednictwem żył płucnych.
- Obieg duży rozpoczyna się w lewej komorze serca, skąd krew przedostaje się do aorty, która następnie za pośrednictwem licznych odgałęzień tętniczych doprowadza krew do poszczególnych narządów i tkanek. Z tkanek i narządów krew jest zbierana systemem żył, doprowadzających ją z powrotem do prawego przedsionka serca.
- Serce człowieka i innych ssaków jest czterojamowe, a jego najgrubszą częścią jest ściana lewej komory.
- Pomiędzy prawym przedsionkiem i prawą komorą znajduje się zastawka przedsionkowo-komorowa trójdzielna, a pomiędzy lewym przedsionkiem i lewą komorą – zastawka przedsionkowo-komorowa dwudzielna.
- U podstawy pnia płucnego i aorty znajdują się zastawki półksiężycowate.
- Cykliczny skurcz serca obejmuje trzy fazy: pierwsza to skurcz przedsionków, druga – skurcz komór, trzecia – rozkurcz serca.
- Elektrokardiogram to zapis elektrycznej aktywności serca, na którym widoczne są załamki P, Q, R, S, T. Odpowiadają one zmieniającym się stanom polaryzacji mięśnia sercowego w różnych fazach jego pracy.
- Bradykardia (spowolnienie akcji serca) oraz tachykardia (przyspieszenie akcji serca) to zaburzenia rytmu serca.
- W czasie badania ciśnienia krwi mierzone jest ciśnienie skurczowe (optimum to 120 mmHg) i rozkurczowe (optimum to 80 mmHg).
- Za automatyzm pracy serca odpowiada układ bodźcotwórczo-przewodzący, złożony z: węzła zatokowo-przedsionkowego, węzła przedsionkowo-komorowego, pęczka przedsionkowo-komorowego (pęczka Hisa) oraz rozchodzących się od niego włókien Purkiniego, biegnących w ścianach wewnętrznych komór.
- Wyróżnia się trzy rodzaje naczyń krwionośnych: tętnice, żyły oraz naczynia włosowate.
- Wyróżnia się trzy rodzaje sieci naczyń rozprowadzających krew: sieć kapilarną (tętnica → naczynia włosowate → żyła), układ wrotny (żyła wrotna → sieć naczyń włosowate wątroby → żyła wątrobowa) oraz sieć dziwną (tętnica → naczynia włosowate → tętnica).

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego na schematach opisujących budowę serca stosuje się przeciwne oznaczenie położenia komór (prawa komora po lewej stronie, a lewa komora po prawej stronie).
2. Omów różnicę między ciśnieniem skurczowym serca a ciśnieniem rozkurczowym.
3. Wymień elementy i opisz mechanizm pobudzenia układu odpowiedzialnego za automatyzm pracy serca.
4. Porównaj pod względem budowy naczynia żylne i tętnicze.
5. Wymień i scharakteryzuj trzy poznane typy sieci naczyń krwionośnych.

BIBLIOGRAFIA

- Konturek S., *Układ krążenia. Fizjologia człowieka*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, 2001.

W INTERNECIE

- http://www.kardiolo.pl/bradykardia.htm
- http://serca.net.pl

36. Funkcje krwi

Krew to płynna tkanka o czerwonej barwie, zawdzięczająca kolor zawartej w niej hemoglobinie. W zależności od stopnia utlenienia może przyjmować różne odcienie: krew utlenowana jest jasnoczerwona, a o niższej zawartości tlenu – ciemnoczerwona. Przeciętnie objętość krwi w organizmie człowieka wynosi około pięciu litrów, co w przybliżeniu stanowi jedną dwunastą masy ciała.

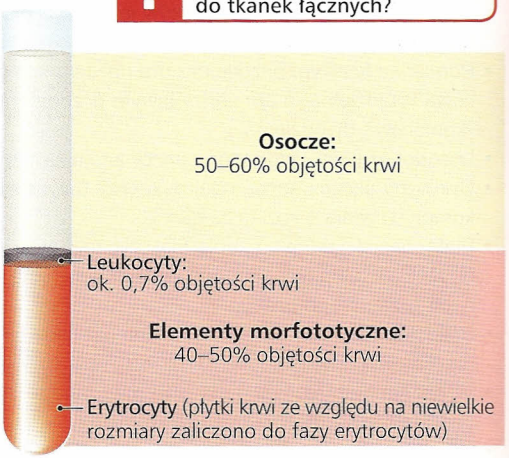
Rola i skład krwi

Krew stanowi środowisko wewnętrzne ustroju, w którym funkcjonują wszystkie komórki i tworzone przez nie tkanki. Realizując to zadanie, krew pełni szereg istotnych funkcji, takich jak:

- transport tlenu z pęcherzyków płucnych w kierunku tkanek
- transport dwutlenku węgla z tkanek do pęcherzyków płucnych
- transport wchłoniętych w jelitach substancji odżywczych (jak cukry, tłuszcze), budulcowych (białka) oraz witamin do tkanek docelowych
- transport zbędnych produktów przemiany materii z tkanek (gdzie zostały wytworzone) do nerek (gdzie są usuwane poza ustrój)
- transport hormonów z miejsc ich syntezy (gruczoły dokrewne) do tkanek docelowych
- uczestnictwo w regulacji temperatury ustroju
- ochrona organizmu przed wnikaniem i rozwojem drobnoustrojów dzięki sprawnie funkcjonującemu układowi odpornościowemu.

Krew składa się z **osocza** (**plazmy**) oraz komórkowych **elementów morfotycznych**, nazywanych potocznie krwinkami. Komórki stanowią 40–50% objętości krwi, a pozostałe 50–60% to osocze. Składa się ono w około 93% z wody, a w 7% z tak zwanych substancji stałych (głównie białek osocza: albumin, globulin oraz fibrynogenu) **(36.1.)**.

? Dlaczego krew jest zaliczana do tkanek łącznych?



36.1. Procentowy skład krwi (uwzględniający podział na osocze i morfotyczne elementy krwi)

:: Ciekawostka

Hematokryt (w skrócie Hct) to parametr krwi wyrażający procentowy stosunek objętości erytrocytów do całkowitej objętości krwi.

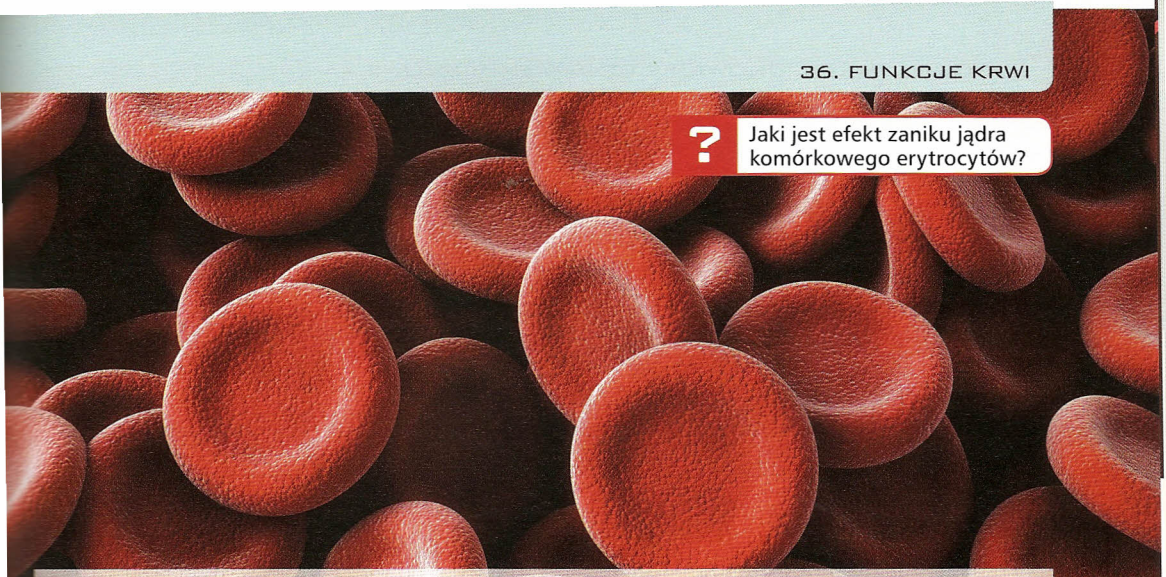
Rola szpiku kostnego

W organizmie człowieka zasadniczym narządem krwiotwórczym jest szpik kostny czerwony, który stanowi około 2,5% masy ciała (drugie tyle stanowi szpik kostny żółty, krwiotwórczo nieczynny). Szpik kostny czerwony zlokalizowany jest głównie w jamach szpikowych kości długich (np. udowej) oraz w istocie gąbczastej trzonów kręgów, mostka, kości biodrowej oraz żeber. Odpowiada za produkcję wszystkich elementów morfotycznych

? Do jakich celów mogą zostać użyte komórki macierzyste szpiku?



36.2. Komórki macierzyste obecne w szpiku kostnym



? Jaki jest efekt zaniku jądra komórkowego erytrocytów?

36.3. Erytrocyty są najliczniejszymi elementami morfotycznymi krwi.

krwi. Powstają one z jednego typu komórki macierzystej szpiku **(36.2.)**, a najważniejszymi z nich są: **erytrocyty** (krwinki czerwone), **leukocyty** (krwinki białe) oraz **trombocyty** (płytki krwi).

Erytrocyty

Spośród składników morfotycznych krwi największą grupę stanowią erytrocyty **(36.3.)**. Ich liczba różni się w zależności od płci (u kobiet jest to ok. 4,8 mln na 1 mm^3 krwi, a u mężczyzn – ok. 5,4 mln). Proces tworzenia erytrocytów to erytropoeza. Obejmuje ona podział komórek macierzystych szpiku, ich różnicowanie oraz zakończenie dojrzewania czerwonych krwinek. W sumie proces ten trwa zaledwie pięć dni. Dojrzałe erytrocyty przedostają się do krwi obwodowej, gdzie pełnią jedną z najważniejszych funkcji w organizmie. Polega ona na transporcie cząsteczek tlenu z pęcherzyków płucnych do tkanek ciała.

Funkcjonalne erytrocyty mają kształt spłaszczonego dwuwklęsłego krążka. Taka budowa zapewnia im olbrzymią elastyczność, szczególnie ważną w czasie przemieszczania się w naczyniach włosowatych o średnicy często mniejszej od średnicy samej krwinki. W procesie dojrzewania w szpiku kostnym erytrocyty tracą jądro komórkowe, zatem są pozbawione zawartego w nim DNA. Nie mogą więc produkować nowych białek, a tym samym – uzupełniać zużywających się szybko struktur i składników komórkowych. Po około 120 dniach ulegają rozpadowi (przede wszystkim w śledzionie, ale również w wątrobie i szpiku kostnym).

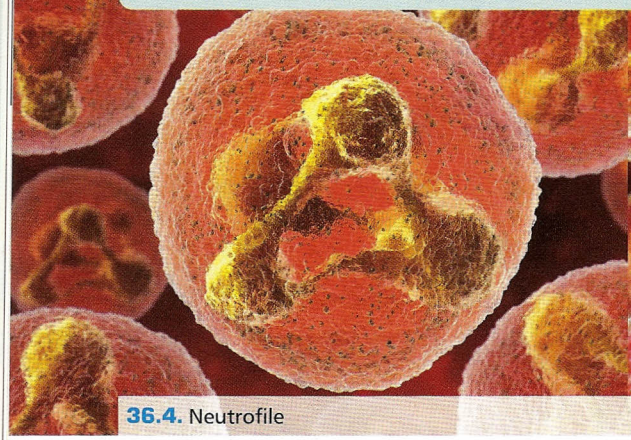
Transportująca tlen hemoglobina pod względem strukturalnym zbudowana jest z części białkowej (**globiny**) oraz części barwnikowej, zawierającej żelazo i nazywanej **hemem**. Dzięki obecności żelaza hemoglobina może łączyć się z tlenem w nietrwały związek – oksyhemoglobinę. Produktem rozpadu hemoglobiny jest głównie **bilirubina**, transportowana do wątroby i usuwana jako składnik żółci na zewnątrz. Z kolei żelazo z rozpadu hemoglobiny zostaje ponownie wykorzystane w trwającym nieprzerwanie procesie hematopoezy.

Leukocyty (krwinki białe)

Komórki te charakteryzują się wyraźnym i dużym jądrem komórkowym. We krwi obwodowej krąży ich tysiąc razy mniej niż erytrocytów (czyli od 4 do 10 tysięcy na mm^3). Duża ich część ma zdolność do wykonywania ruchów pełzakowatych, co umożliwia im przedostawanie się poza światło naczynia krwionośnego, w kierunku tkanek docelowych. Niektóre z nich, dzięki zdolności do wytwarzania nibynóżek, mogą otaczać, a następnie – na drodze fagocytozy – wchłaniać i trawić cząstki obce (bakterie, wirusy, grzyby).

Leukocyty pod względem budowy dzieli się na dwie zasadnicze grupy: **krwinki białe ziarniste** (**granulocyty**) oraz **krwinki białe nieziarniste** (**agranulocyty**).

Granulocyty powstają w szpiku kostnym. Ich charakterystyczną cechą jest występowanie ziarnistości na obszarze cytoplazmy. Wyróżnia się wśród nich trzy rodzaje: neutrofile, eozynofile i bazofile.



36.4. Neutrofile



36.5. Eozynofile

a) **Neutrofile** (**granulocyty obojętnochłonne**) są największą grupą krwinek białych (stanowią 50–70% wszystkich leukocytów), a przy tym ich ilość znacząco wzrasta w stanach zapalnych **(36.4.)**. Mają duże jądro komórkowe. Poruszają się ruchem pełzakowatym, wykazują również zdolność do fagocytozy obcych mikroorganizmów. W miejscu rozwoju stanu zapalnego szybko giną, uwalniając enzymy zawarte w lizosomach, co ma działanie bakteriobójcze i przyczynia się do powstania ropy.

b) **Eozynofile** (**granulocyty kwasochłonne**) stanowią jedynie 1–5% wszystkich leukocytów **(36.5.)**. Ich duże jądro komórkowe ma kształt półksiężyca. Poruszają się ruchem pełzakowatym i wykazują zdolność do fagocytozy. Są odpowiedzialne za niszczenie obcych białek o charakterze alergenów. Poza tym ich ilość wzrasta podczas zarażenia pasożytami, gdyż cechuje je zdolność do niszczenia larw i jaj pasożytów.

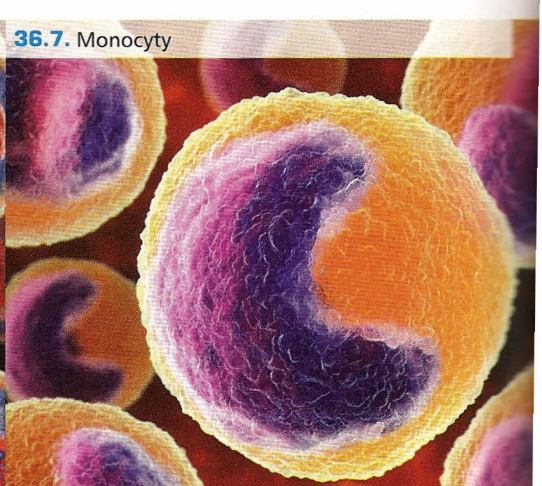
c) **Bazofile** (**granulocyty zasadochłonne**) stanowią jedynie około 0,5% wszystkich leukocytów; mają zdolność do fagocytozy **(36.6.)**. Po opuszczeniu naczyń krwionośnych przekształcają się w komórki tuczne. Odgrywają szczególną rolę w stanach alergicznych, takich jak katar sienny i reakcje na ukąszenie owadów. Po kontakcie z alergenem opróżniają swoje ziarnistości cytoplazmatyczne, zawierające histaminę. Hormon ten zwiększa przepuszczalność naczyń krwionośnych.

Agranulocyty to leukocyty, w których cytoplazmie nie występują ziarnistości. Wyróżnia się wśród nich dwie główne grupy – monocyty i limfocyty.

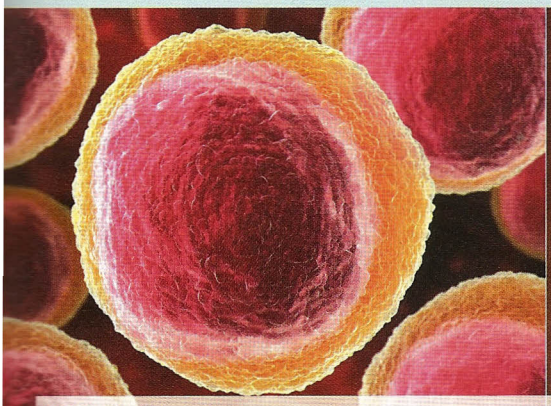
a) **Monocyty** stanowią 5% wszystkich leukocytów i są z nich największe **(36.7.)**. Cechuje je duże nerkowate jądro komórkowe i najbardziej rozwinięte wśród krwinek białych zdolności do fagocytozy. Monocyty powstają w szpiku kostnym, skąd przedostają się do układu krążenia. Pozostają w nim do 36 godzin, by następnie przemieścić się do tkanki łącznej i przekształcić w makrofagi. Wydzielają szereg substancji sygnałowych, takich jak: interferony (m.in. ograniczające zdolności namnażania wirusów) i interleukiny (stymulujące podziały limfocytów).



36.6. Bazofile



36.7. Monocyty



36.8. Limfocyty



? Jakie konsekwencje może mieć zaburzenie nazywane małopłytkowością?

36.9. Trombocyty

b) **Limfocyty**, podobnie jak monocyty, mają kuliste jądro i są okrągłe **(36.8.)**. Stanowią 20–40% wszystkich leukocytów. Odpowiadają za rozwój wielu rodzajów odporności skierowanej przeciwko konkretnemu antygenowi (czyli tzw. odpowiedzi swoistej). Wyróżnia się wśród nich: produkujące przeciwciała **limfocyty B**, pomocnicze **limfocyty Th** oraz cytotoksyczne **limfocyty Tc**.

Trombocyty (płytki krwi)

Trombocyty, czyli płytki krwi, są fragmentami megakariocytów – komórek olbrzymich szpiku **(36.9.)**. W jednym mm^3 krwi jest ich ok. 130–450 tys. Zwykle, podobnie jak erytrocyty, nie mają jądra komórkowego. Żyją zaledwie 8–10 dni, a ich główne zadanie polega na inicjacji procesu krzepnięcia krwi.

Proces krzepnięcia krwi

Ze względu na kluczową rolę, jaką krew odgrywa w organizmie, utrata nawet niewielkiej jej ilości może mieć groźne konsekwencje. Dlatego w układzie krwionośnym funkcjonuje szybki i skuteczny system, który służy zatamowaniu wypływu krwi spowodowanego uszkodzeniem naczyń krwionośnych. Powstrzymanie krwotoku oraz odbudowa uszkodzonego naczynia są możliwe dzięki tworzeniu w tym miejscu **skrzepu (36.10.)**. Proces powstawania skrzepu jest złożony, a na jego przebieg wpływa wiele czynników. Niedobór któregokolwiek z nich poważnie upośledza lub zaburza proces krzepnięcia krwi.

W miejscu uszkodzenia śródbłonka naczynia krwionośnego zostają odsłonięte położone głębiej białka. Płytki krwi wykazują duże powinowactwo do tych peptydów i przyczepiają się do nich. Zlepione płytki się rozpadają, w wyniku czego uwalniają serotoninę. Powoduje to obkurczenie się włókien mięśni gładkich uszkodzonego naczynia, co częściowo tamuje krwotok.

Oprócz serotoniny rozpadające się płytki krwi wydzielają do otoczenia enzym trombokinazę. Współdziała on z białkami osocza, czynnikami



? Jakie znaczenie ma zdolność krwi do krzepnięcia?

36.10. Tworzący się skrzep

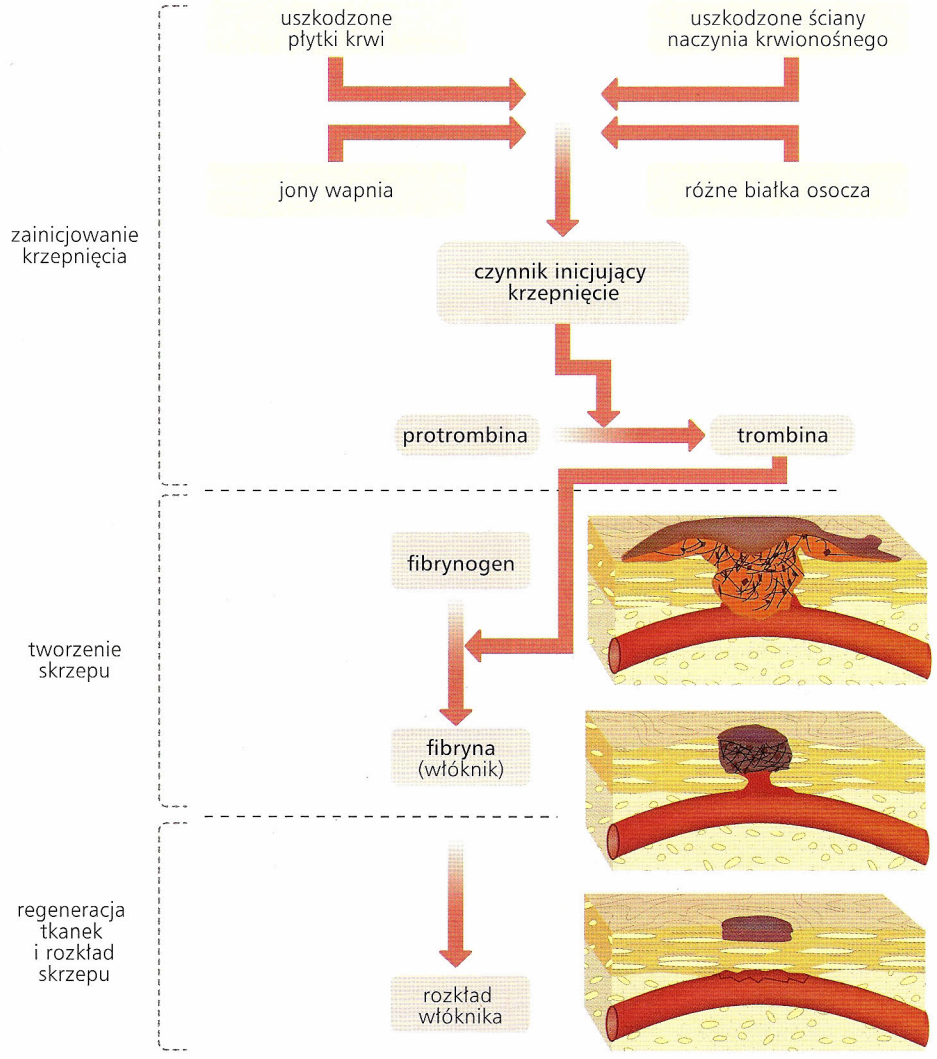
:: Ciekawostka

Określenia „skrzep" używa się w odniesieniu do struktur powstających na powierzchni skóry. Jeśli z jakichś powodów dochodzi do wytworzenia skrzepu wewnątrz naczyń krwionośnych, mówi się o zakrzepie. Ponieważ blokuje on przepływ krwi przez naczynie, to (w zależności od lokalizacji) może stanowić poważne zagrożenie dla zdrowia lub życia.

uwalnianymi z uszkodzonych tkanek oraz z **jonami wapnia** rozpuszczonymi w osoczu. Dzięki temu aktywuje białko istotne w procesie krzepnięcia – **protrombinę**. Jest ona stale obecna w osoczu, ale pod wpływem wymienionych powyżej czynników przekształca się w formę aktywną, czyli **trombinę**. Pojawienie się trombiny w osoczu zapoczątkowuje przemianę obecnego w nim **fibrynogenu** do **fibryny** (włóknika). Włókna fibryny tworzą gęstą sieć, w której zatrzymują się elementy morfotyczne krwi, tworzące ostatecznie skrzep **(36.11.)**.

:: Ciekawostka

Krzepnięciu krwi in vitro można zapobiec na różne sposoby. Jeden z nich polega na usunięciu z niej jonów wapnia. Do tego celu używa się soli wiążących wapń (jak np. szczawian sodu lub cytrynian sodu). Silne właściwości przeciwzakrzepowe wykazuje również heparyna (hamująca działanie trombiny) oraz pochodne kumaryny (hamujące syntezę protrombiny w wątrobie).



36.11. Etapy tworzenia skrzepu

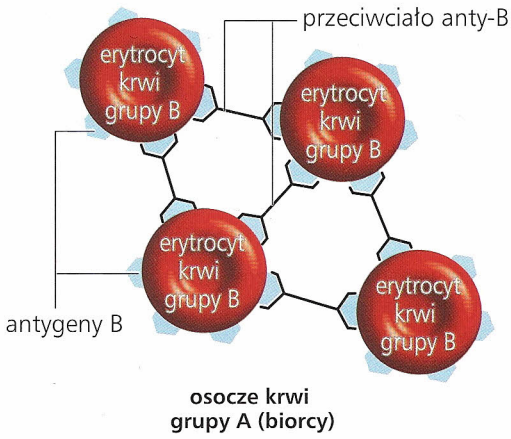
? Wymień czynniki potrzebne do utworzenia skrzepu.

Grupy krwi

Układ immunologiczny nie tylko chroni organizm przed drobnoustrojami i rozwojem komórek nowotworowych, lecz także stoi na straży jego integralności tkankowej, ponieważ rozpoznaje obce (przeszczepione) tkanki lub narządy. Pierwszą tkanką, jaką próbowano przeszczepić, była krew. Problem stwarzały jednak specyficzne antygeny występujące na powierzchni erytrocytów. W wyniku przetoczenia krwi niewłaściwemu biorcy mogły one zostać związane przez przeciwciała pochodzące z jego krwi. Aby tego uniknąć, wyodrębniono układy grupowe krwi (obecnie znanych jest ich 23). Najważniejszą rolę odgrywają układ AB0 oraz układ Rh.

Antygeny układu grupowego AB0 to wielocukry. Wkrótce po urodzeniu w osoczu pojawiają się natomiast przeciwciała (tzw. aglutyniny). Są one skierowane przeciwko antygenom nieobecnym na swoich własnych komórkach i mają zdolność aglutynacji, czyli zlepiania erytrocytów (**36.12.**). Powstające skupiska komórek mogą prowadzić do zablokowania przez nie naczyń włosowatych.

W najlepszej sytuacji znajdują się osoby o grupie krwi AB, których krwinki wyposażone są w oba antygeny, a w osoczu nie występują aglutyniny.



36.12. Przebieg reakcji aglutynacji

Osobom takim można przetoczyć krew dowolnej grupy, nazywa się je więc **uniwersalnymi biorcami**. Z kolei osoby z grupą krwi 0 mają krwinki pozbawione na powierzchni antygenów A i B, lecz ich organizm produkuje w osoczu oba rodzaje przeciwciał. Zatem takim osobom można przetaczać krew wyłącznie grupy 0. Ich krew może jednak zostać przetoczona osobie o dowolnej grupie krwi, w związku z czym nazywane są **uniwersalnymi dawcami**.

Zgodność grup krwi

Grupa krwi	Antygen	Przeciwciała w osoczu	Może być dawcą dla	Może być biorcą od
A	A	aglutynina anty-B	A, AB	A, 0
B	B	aglutynina anty-A	B, AB	B, 0
AB	A i B	brak	AB	uniwersalny biorca (A, B, AB, 0)
0	0	aglutynina anty-A i aglutynina anty-B	uniwersalny dawca (A, B, AB, 0)	0

Antygen Rh

Poza antygenami grupowymi A, B lub 0 krwinki czerwone mogą zawierać również czynnik powierzchniowy Rh. Jego nazwa pochodzi od małpy – rezusa (*Maccacus rhesus*), u której jako pierwszej wykryto ten antygen. Osoby, u których on nie występuje, określa się jako Rh^- (ok. 15% populacji rasy białej). Nie produkują one przeciwciał anty-Rh, dopóki nie przetoczy im się (np. w wyniku transfuzji) krwi zawierającej antygen Rh. Podobnie jak w układzie AB0, dochodzi wówczas do aglutynacji przetoczonych krwinek. Osoby, u których antygen Rh występuje (określane jako Rh^+), nie wytwarzają przeciwciał nawet w przypadku przetoczenia krwinek Rh^-. Znajomość obecności czynnika Rh ma szczególne znaczenie dla kobiet planujących ciążę, umożliwia bowiem uniknięcie konfliktu serologicznego (omówionego w rozdziale poświęconym układowi odpornościowemu).

:: Ciekawostka

Będące wielocukrami antygeny grup krwi A oraz B powstały w wyniku mutacji, do której doszło w odległej przeszłości gatunku Homo sapiens. Spowodowała ona, że enzymy tworzące te antygeny różnią się zaledwie czterema aminokwasami (spośród wszystkich 353). Grupa 0 powstała w wyniku delecji, jaka zaszła w obrębie genu kodującego enzym tworzący antygen A.

PODSUMOWANIE



- Krew jest tkanką łączną płynną, niezbędną dla funkcjonowania organizmu.
- Krew odpowiada przede wszystkim za transport gazów oddechowych, substancji odżywczych i produktów przemiany materii, termoregulację oraz ochronę organizmu.
- Krew składa się z osocza (50–60% objętości) oraz elementów morfotycznych.
- Najliczniejszą grupą elementów morfotycznych są erytrocyty, pozbawione jądra komórkowego (jest ich 4,8–5,4 mln na mm^3 krwi). Zawierają one barwnik (hemoglobinę) umożliwiający wiązanie tlenu.
- Drugą grupę elementów morfotycznych stanowią leukocyty, odpowiadające za reakcje odpornościowe. Wyróżnia się wśród nich granulocyty (neutrofile, bazofile, eozynofile) oraz agranulocyty (limfocyty B i T oraz monocyty).
- Ostatnią grupę komórkowych składników krwi stanowią trombocyty, odpowiadające za proces krzepnięcia krwi i naprawę uszkodzonych naczyń krwionośnych.
- Proces krzepnięcia krwi rozpoczyna się od uwolnienia serotoniny i trombokinazy z rozpadających się trombocytów, zasklepiających miejsce uszkodzenia naczynia krwionośnego.
- Serotonina obkurcza naczynia, trombokinaza natomiast przekształca obecną we krwi protrombinę w trombinę. Ta z kolei przekształca fibrynogen w nierozpuszczalną fibrynę (włóknik). Tworzy ona gęstą sieć, w której zostają uwięzione elementy morfotyczne. To tamuje krwotok.
- U człowieka wyróżnia się dwa główne układy grupowe krwi: ABO oraz Rh.
- W układzie ABO stale obecne w surowicy przeciwciała (aglutyniny) oddziałują z antygenami obecnymi na powierzchni krwinek. Sytuacja taka zachodzi jedynie w przypadku przetoczenia krwi o niewłaściwej grupie.
- W układzie Rh przeciwciała wywołujące aglutynację są wytwarzane jedynie przez osoby o grupie Rh^- po kontakcie z krwinkami typu Rh^+.

ZADANIA



1. Wymień funkcje krwi związane z utrzymaniem homeostazy organizmu.
2. Scharakteryzuj skład krwi.
3. Określ rolę szpiku kostnego w utrzymaniu stałego składu morfologicznego krwi.
4. Omów czynniki wpływające na proces tworzenia erytrocytów.
5. Omów główną przyczynę różnic w ilości erytrocytów między kobietami a mężczyznami.
6. Podziel krwinki białe na dwie kategorie, jako kryterium przyjmij ich budowę.
7. Omów poszczególne etapy procesu krzepnięcia krwi.

BIBLIOGRAFIA



- Opracowanie zbiorowe pod redakcją Dąbrowskiego Z., *Fizjologia krwi. Wybrane zagadnienia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2000.
- Szymański A., *Serce i układ krążenia*, Wydawnictwo Dom na Wsi, 2004.

W INTERNECIE

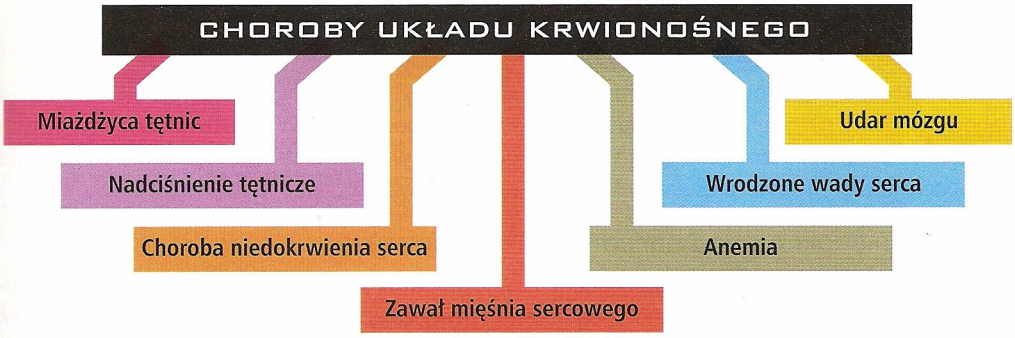


- http://www.sgsp.edu.pl/studenci/hdk/start.php

37. Choroby układu krwionośnego

Sprawność układu krążenia ma kluczowe znaczenie dla zdrowia i życia organizmu, jednak różnorodne czynniki zaburzają funkcjonowanie tego układu. Są to między innymi: czynniki stresogenne (towarzyszące codziennemu życiu), brak aktywności fizycznej, dieta bogata w tłuszcze i cholesterol, czy wreszcie – nadużywanie alkoholu. Powoduje to, że w układzie krwionośnym rozwijają się stany chorobowe.

Choroby układu krwionośnego

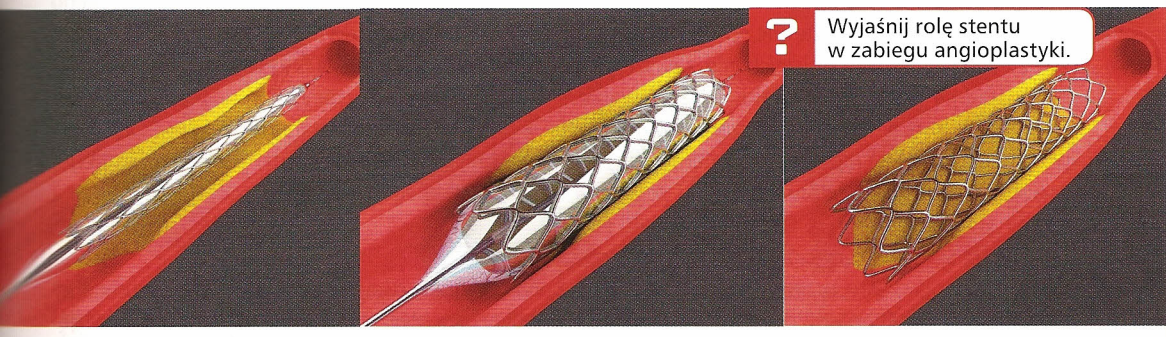


Choroby układu sercowo-naczyniowego, jak sugeruje ich nazwa, dotyczą mięśnia sercowego bądź naczyń krwionośnych.

Miażdżyca tętnic

Choroba ta nazywana jest również **arteriosklerozą** i ma przewlekły charakter. Jej rozwój wiąże się z powstawaniem zmian zwyrodnieniowych w obrębie warstwy wewnętrznej i środkowej tętnic. Polega to głównie na odkładaniu się w nich pokładów lipidów (przede wszystkim cholesterolu) oraz wapnia. W wyniku tego dochodzi do zwężenia ścian tętnic (zwłaszcza aorty, tętnic wieńcowych oraz zaopatrujących mózg), co z czasem prowadzi do niedokrwienia i niedotlenienia tych obszarów organizmu. Na podłożu miażdżycy mogą rozwijać się inne groźne choroby układu krwionośnego (jak choroba niedokrwienna serca, zawał mięśnia sercowego, udar mózgu). Najważniejszymi czynnikami sprzyjającymi rozwojowi miażdżycy są: dieta bogata w tłuszcze, otyłość, czynniki genetyczne, palenie tytoniu, stres, cukrzyca typu II oraz nadciśnienie tętnicze.

W leczeniu zaawansowanej miażdżycy tętnic stosuje się tak zwaną **angioplastykę** (37.1.). Zabieg polega na wprowadzeniu cewnika do naczyń objętych procesem chorobowym. Znajdujący się w nim niewielki balonik zostaje napełniony, co pozwala poszerzyć zablokowaną tętnicę. Następnie zakłada



? Wyjaśnij rolę stentu w zabiegu angioplastyki.

37.1. Zabieg angioplastyki udrażniający zablokowane przez blaszkę miażdżycową naczynie krwionośne

się stent (rodzaj siatkowej sprężyny) umożliwiający zachowanie poszerzonego światła naczynia.

Nadciśnienie tętnicze

Ciśnienie krwi zmienia się w zależności od wieku. W uproszczeniu za optymalne uznaje się ciśnienie skurczowe o wartości około 120 mmHg, a ciśnienie rozkurczowe – około 80 mmHg. Utrzymujące się wyższe wartości są traktowane jako stan nadciśnienia tętniczego. W większości przypadków nadciśnienie tętnicze ma charakter pierwotny, co oznacza, że nie można jednoznacznie określić jego przyczyny (chociaż wskazuje się na predyspozycje genetyczne i czynniki środowiskowe). Drugą grupę stanowią pacjenci, u których choroba nadciśnieniowa serca jest następstwem istniejącego procesu chorobowego (np. otyłości, stresu, chorób nerek).

Ciśnienie tętnicze		
Kategoria	**skurczowe (mmHg)**	**rozkurczowe (mmHg)**
ciśnienie optymalne	< 120	< 80
ciśnienie prawidłowe	120–129	80–84
ciśnienie wysokie prawidłowe	130–139	85–89
nadciśnienie stopień 1 (łagodne)	140–159	90–99
nadciśnienie stopień 2 (umiarkowane)	160–179	100–109
nadciśnienie stopień 3 (ciężkie)	≥ 180	≥ 110

Choroba niedokrwienna serca

Jest to zespół objawów chorobowych, będący następstwem długotrwałego, niedostatecznego zaopatrzenia mięśnia sercowego w tlen i substancje odżywcze. Choroba rozwija się na skutek miażdżycy tętnic wieńcowych, a objawia się jako tak zwana **dusznica bolesna**. Powoduje ona uczucie ucisku, bólu lub ciasnoty w klatce piersiowej (ból może promieniować – głównie do rąk, odcinka szyjnego oraz szczęki). Objawy te zaostrzają się po intensywnym wysiłku fizycznym, obfitym posiłku lub po nagłym, silnym przeżyciu emocjonalnym, ustępują natomiast w stanie spoczynku. Postępujące objawy dusznicy bolesnej prowadzą nieodwołalnie do zawału mięśnia sercowego.

Zawał mięśnia sercowego

Polega na trwałym zablokowaniu przepływu krwi w części naczyń wieńcowych wiodących krew do mięśnia sercowego. Do zawału dochodzi w wyniku rozwoju miażdżycy tętnic, choć stopniowe zwężanie się naczyń tętniczych nie zawsze jest bezpośrednią przyczyną zawału. Zaczopowanie tętnic wieńcowych następuje najczęściej w wyniku przemieszczenia się do nich fragmentu blaszki miażdżycowej, która oderwała się od ścian innego naczynia (np. aorty). Objawem zawału jest najczęściej silny, piekący ból w klatce piersiowej (za mostkiem), często promieniujący w różnych kierunkach. Poza bólem pojawia się również uczucie lęku, występują duszności oraz intensywne pocenie się. W razie uwidocznienia się tych objawów konieczne jest wezwanie pogotowia ratunkowego.

Udar mózgu

Udar mózgu polega na częściowym lub całkowitym zakłóceniu czynności mózgu na skutek zaburzenia krążenia krwi w tkance mózgowej. Wyróżnia się dwa rodzaje udarów mózgu:

- **krwotoczny** (nazywany potocznie wylewem), powstający w wyniku pęknięcia naczynia krwionośnego i wylania się krwi do tkanki mózgu;
- **niedokrwienny** (nazywany **zawałem mózgu**), spowodowany zatrzymaniem dopływu krwi do części tkanki mózgowej.

Ryzyko wystąpienia udaru rośnie wraz z wiekiem. Udar jest trzecią co do częstości przyczyną zgonów spowodowanych dysfunkcjami układu krwionośnego.

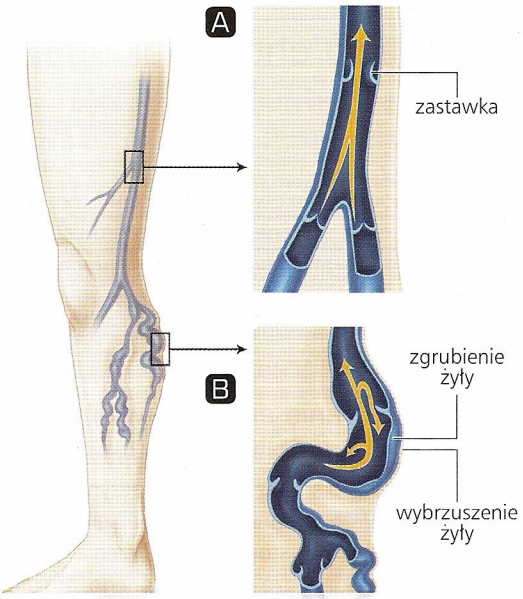
Anemia

Zwana również niedokrwistością cechuje się obniżoną ilością hemoglobiny lub samych erytrocytów we krwi. Prowadzi do zmniejszenia ilości tlenu transportowanego do tkanek, co skutkuje spadkiem tempa metabolizmu. Najczęstszą przyczyną anemii są niedobory żelaza (stanowiącego niezbędny składnik hemoglobiny) oraz zaburzenia funkcji śledziony, w wyniku których dochodzi do patologicznego, przyspieszonego rozpadu erytrocytów.

Żylaki

Bardzo niskie ciśnienie krwi w żyłach powoduje, że jedynym skutecznym mechanizmem umożliwiającym jej przepływ są skurcze mięśni sąsiadujących

z naczyniami. Dotyczy to jednak tylko żył biegnących głęboko, natomiast jest nieskuteczne wobec żył znajdujących się blisko powierzchni skóry. Jeśli w wyniku długotrwałego spowolnienia przepływu krwi dojdzie do jej zalegania w naczyniach, wówczas cienkie ściany żył mogą nadmiernie się rozciągać, wydłużać i skręcać. Uwidacznia się to w postaci tak zwanego **żylaka** (37.2.). Do powstawania żylaków przyczynia się również niewydolność zastawek żylnych, która prowadzi do cofania się krwi, potęgującego efekt poszerzania naczyń. Czynnikiem sprzyjającym powstawaniu żylaków jest wykonywanie pracy stojącej (np. farmaceuta, fryzjer).



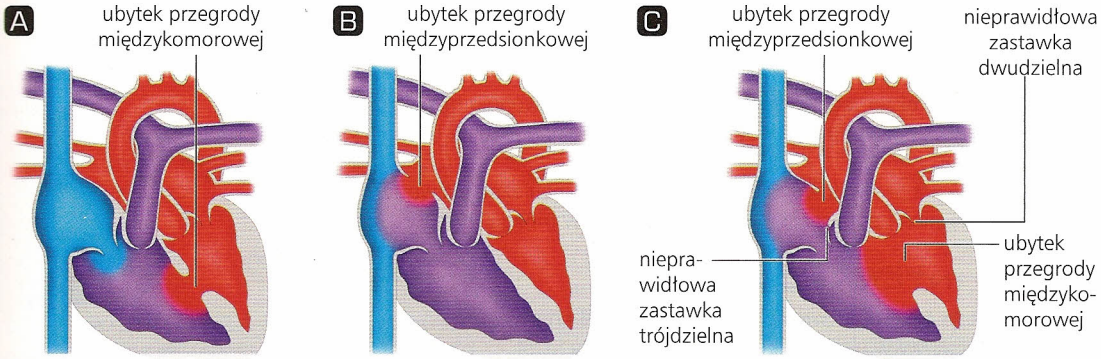
37.2. Budowa żyły zdrowej (A) oraz zdeformowanej w wyniku powstania żylaków (B)

Wrodzone wady serca

Serce jest mięśniem o złożonej strukturze, wykonującym swą pracę nieprzerwanie od pierwszych tygodni życia płodowego aż po moment śmierci. Warunkiem jego sprawnego funkcjonowania jest właściwa budowa. Pojawiające się już w życiu płodowym nieprawidłowości mogą bardzo poważnie wpływać na rozwój organizmu i stanowić zagrożenie dla życia. Na szczęście możliwości współczesnej medycyny pozwalają na usuwanie większość wad serca u dzieci.

Najczęściej spotykaną wadą serca jest ubytek przegrody międzykomorowej. Objawia się ona brakiem fragmentu przegrody oddzielającej komory serca (37.3.). Przy większym ubytku pojawiają się przyspieszony oddech, tachykardia, niewydolność krążenia. Terapia polega na leczeniu farmakologicznym lub operacyjnym zamknięciu ubytku w pierwszych miesiącach życia. Inną wadą jest ubytek przegrody międzyprzedsionkowej, polegający na braku fragmentu ściany oddzielającej przedsionki (37.4.). Objawami tej wady mogą być zakażenia układu oddechowego i duszności odczuwane przy zwiększonym wysiłku fizycznym. Leczenie polega na operacyjnym zamknięciu ubytku.

Kanał przedsionkowo-komorowy to grupa wad wrodzonych, objawiających się różnego stopnia niedorozwojem przegrody międzyprzedsionkowej i międzykomorowej, a także nieprawidłowym wykształceniem zastawek przedsionkowo-komorowych (dwu- oraz trójdzielnej) (37.5.). Objawami są tachykardia, powiększenie wątroby, duszności oraz opóźnienie rozwoju fizycznego. W przypadku stwierdzenia wady konieczne jest natychmiastowe leczenie operacyjne, pozwalające na przywrócenie prawidłowego przepływu krwi przez serce.



37.3. Ubytek przegrody międzykomorowej serca (A), ubytek przegrody międzyprzedsionkowej serca (B), kanał przedsionkowo-komorowy (C) (kolorem czerwonym oznaczono krew utlenowaną, fioletowym – krew mieszaną, niebieskim – krew odtlenowaną)

Leczenie chorób układu krwionośnego

W sytuacjach, gdy jakiś element serca jest wadliwy (niedomykające się zastawki, otwory między przegrodami serca), często jedynym ratunkiem staje się operacja na otwartym sercu. Kluczowym wyposażeniem sali operacyjnej przeprowadzającej zabiegi na otwartym sercu jest płucoserce. Przejmuje ono funkcję unieruchomionego na czas operacji serca, zapewniając zaopatrzenie organizmu w utlenioną krew.

Pomostowanie aortalno-wieńcowe

Ta operacja, potocznie nazywana **bypassem**, polega na wszczepieniu sztucznego naczynia w celu ominięcia zwężonej tętnicy wieńcowej serca. Dzięki temu poprawia się stopień zaopatrzenia w tlen i substancje odżywcze niedokrwionego obszaru mięśnia sercowego, co pozwala uratować osoby, u których doszło do zawału mięśnia sercowego. Do utworzenia pomostu zwykle wykorzystuje się fragment żyły lub tętnicy pobrany od samego pacjenta.

Transplantacja serca

Jest to metoda leczenia stosowana w wypadku stwierdzenia skrajnej niewydolności serca pacjenta. Polega na przeszczepieniu serca pobranego od martwego dawcy. Ponieważ biorca i dawca zazwyczaj znajdują się w rożnych szpitalach, konieczne staje się odpowiednie przygotowanie serca do celów transportu, polegające przede wszystkim na jego schłodzeniu. Okres, w jakim serce powinno zostać przeszczepione, nie powinien przekraczać kilku godzin.

PODSUMOWANIE

- Wszelkie choroby układu krwionośnego stanowią poważne zagrożenie dla życia organizmu.
- Do najczęściej spotykanych chorób układu krwionośnego należą: miażdżyca tętnic, choroba niedokrwienna serca, zawał mięśnia sercowego, nadciśnienie tętnicze, udar mózgu.
- Miażdżyca tętnic polega na odkładaniu się w ścianach naczyń złogów lipidów (głównie cholesterolu) i wapnia, co prowadzi do zmniejszenia średnicy tętnic.
- Zwężenie tętnic może prowadzić do niedokrwienia pewnych obszarów organizmu, czego następstwem mogą być: nadciśnienie tętnicze, choroba niedokrwienna serca, zawał mięśnia sercowego.
- Nadciśnienie tętnicze polega na trwałym lub czasowym podniesieniu ciśnienia tętniczego powyżej wartości uznawanych za prawidłowe.
- Choroba niedokrwienna serca polega na przewlekłym niedotlenieniu mięśnia sercowego, co może prowadzić do zawału serca.
- Zawał serca jest konsekwencją całkowitego zatamowania przepływu krwi w naczyniach wieńcowych. Stan ten zagraża życiu.
- Udar niedokrwienny mózgu jest spowodowany zablokowaniem naczyń krwionośnych doprowadzających krew do pewnego jego fragmentu, a udar krwotoczny mózgu – pęknięciem naczyń krwionośnych w jego obrębie.

ZADANIA

1. Scharakteryzuj przyczyny i możliwe konsekwencje miażdżycy tętnic.
2. Podaj nazwę choroby, której objawem jest dusznica bolesna, i wyjaśnij, jak ją rozpoznać.
3. Określ prawidłowe parametry ciśnienia tętniczego krwi.
4. Wymień i scharakteryzuj rodzaje udarów mózgu.

W INTERNECIE

- http://www.pierwszapomoc.net.pl/zawal.php
- http://www.udarmozgu.pl/ogolne/choroby.html

38. Elementy układu odpornościowego

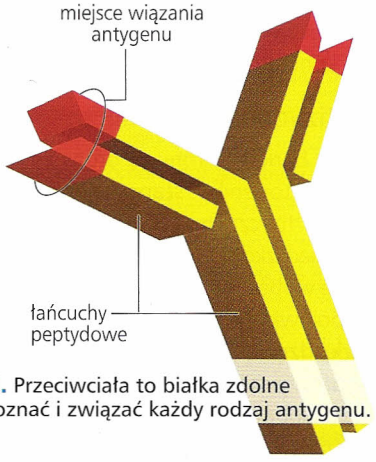
W środowisku występuje wiele **biologicznych czynników zakaźnych**: od wirusów, poprzez bakterie, grzyby, pierwotniaki, na wielokomórkowych pasożytach kończąc. Gdy wnikają one do organizmu i rozwijają się w nim, mogą powodować choroby, które w skrajnych przypadkach prowadzą nawet do śmierci. Na ogół jednak zdrowy i silny organizm szybko radzi sobie z infekcją, w rezultacie przywraca stan homeostazy. Jest to możliwe dzięki istnieniu sprawnego układu immunologicznego, który zwalcza czynniki zakaźne.

Elementy układu odpornościowego człowieka

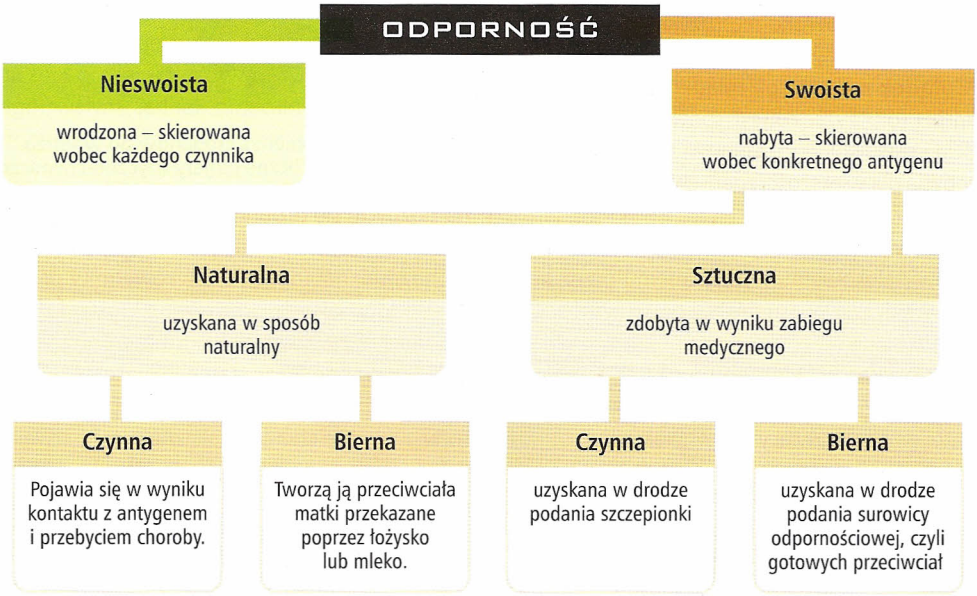
Nauka o odporności to **immunologia**, a do jej najważniejszych pojęć należą dwa: antygeny i przeciwciała **(38.1.)**.

Antygeny to dowolne substancje (np. białka, cukry lub lipidy), które wzbudzają odpowiedź ze strony układu immunologicznego oraz mogą wiązać skierowane przeciw sobie przeciwciała. Antygeny mogą pochodzić z zewnątrz i być elementem obcych organizmów (np. bakterii) lub znajdować się na powierzchni własnych komórek.

? Czy produkcja przeciwciał zawsze jest korzystna dla organizmu?



38.1. Przeciwciała to białka zdolne rozpoznać i związać każdy rodzaj antygenu.



Przeciwciała to białka wydzielane przez pobudzone limfocyty B (tzw. komórki plazmatyczne) w odpowiedzi na antygen pojawiający się w ustroju, obcy wobec własnych tkanek. Cechą przeciwciała jest zdolność do połączenia się z odpowiadającym mu antygenem, co prowadzi do utworzenia kompleksu antygen – przeciwciało. Uruchamia on cały szereg przemian, prowadzących do likwidacji lub unieczynnienia struktury zawierającej dany antygen.

Nieswoiste mechanizmy obronne

Nieswoiste (inaczej: niespecyficzne) reakcje obronne to wszelkiego typu mechanizmy i naturalne bariery, które prowadzą do szybkiej eliminacji antygenu z ustroju lub też zapobiegają jego wniknięciu do organizmu. Mechanizmy te uaktywniają się w momencie kontaktu z antygenem. Jednak ich działanie nie jest specyficzne, dlatego może być mniej efektywne niż odpowiedź skierowana przeciwko konkretnemu patogenowi.

Bariery fizyczne i chemiczne

Podstawową barierę chroniącą organizm przed wnikaniem patogenów stanowią przeszkody o charakterze fizycznym, jak nienaruszone powłoki ciała (nieuszkodzona skóra) czy środowisko nieprzyjazne wobec mikroorganizmów (żołądka, pochwy, spojówki i powierzchni oka) **(38.2.)**.

Nieuszkodzona skóra, pokryta rogową warstwą naskórka, jest nieprzepuszczalna dla drobnoustrojów. Dodatkowo ma ona kwaśny odczyn (pH 3–5) dzięki kwasowi mlekowemu i kwasom tłuszczowym wydzielanym przez gruczoły łojowe. Stwarza to środowisko niesprzyjające rozwojowi mikroorganizmów.

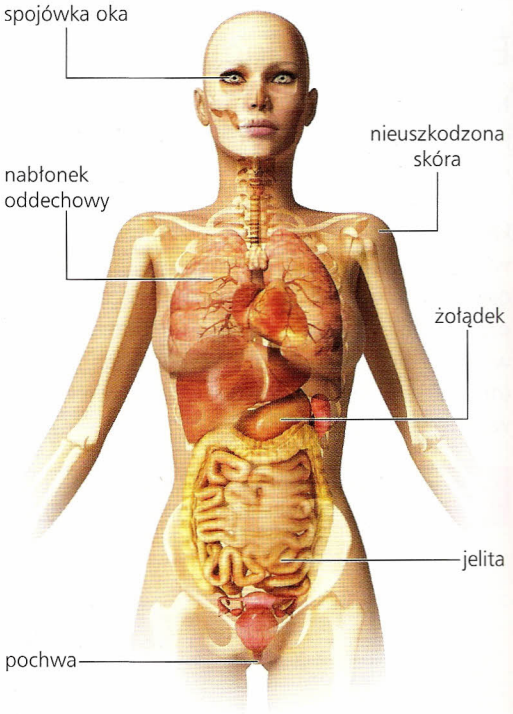
Żołądek zawiera sok żołądkowy o bardzo niskim pH (ok. 1–2), co jest spowodowane obecnością kwasu solnego. Stanowi to barierę nie do przebycia dla większości znanych drobnoustrojów chorobotwórczych.

Pochwa również wykazuje niskie pH dzięki kwasowi mlekowemu wydzielanemu przez beztlenowe pałeczki kwasu mlekowego (*Lactobacillus acidophilis*).

Spojówka i **powierzchnia oka** są chronione przed większością bakterii dzięki **lizozymowi**. Jest to enzym trawiący główny składnik ściany komórkowej bakterii, czyli mureinę.

Możliwe jest również mechaniczne usunięcie drobnoustrojów, którym udało się wniknąć do wnętrza organizmu. Przykładem takiej reakcji mogą być **kaszel** oraz **kichanie**, które pozwalają na pozbycie się drobnoustrojów z gardła, krtani oraz jamy nosowej. Dużą rolę odgrywa również ruch rzęsek nabłonka migawkowego w przewodach oddechowych, przemieszczający w kierunku gardła śluz zawierający mikroorganizmy. Bariery fizyczne i chemiczne zapewniają organizmowi ograniczone możliwości obrony. Typowe patogeny wywołujące choroby zakaźne w toku trwającej dziesiątki tysięcy lat ewolucji nabyły zdolność omijania tych prostych zabezpieczeń. Dzięki temu skutecznie wnikają do organizmu, zwłaszcza gdy jest ich wystarczająco dużo. Wówczas zaangażowane zostają elementy dru-

? Jakie czynniki mogą doprowadzić do przełamania przedstawionych na ilustracji barier?

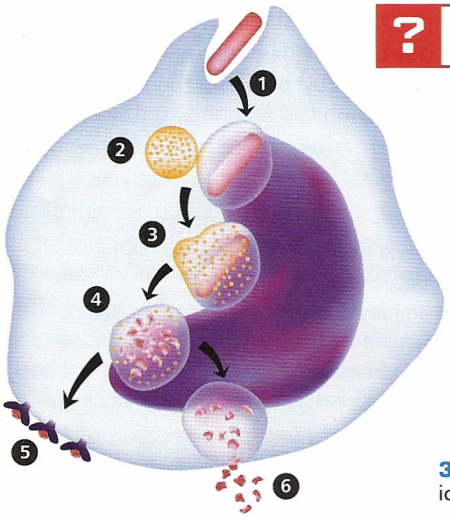


38.2. Przed wnikaniem patogenów do wnętrza organizmu chronią liczne bariery fizyczno-chemiczne.

giej linii obrony, która również ma charakter nieswoisty, lecz działa w sposób ofensywny, jest więc o wiele skuteczniejsza.

Komórki żerne

Komórki zdolne do fagocytozy (scharakteryzowane w rozdziale 36.) stanowią trzon drugiej linii obrony organizmu przed patogenami (38.3.). Są to: **monocyty**, wywodzące się z nich **makrofagi** oraz **neutrofile**, należące do granulocytów. Dzięki fagocytozie drobnoustroje szkodliwe dla organizmu oraz zewnątrzkomórkowe patogeny (np. toksyny bakteryjne) są sprawnie eliminowane. Fragmenty ich antygenów są następnie prezentowane innym komórkom w celu ich wykorzystania do pobudzenia mechanizmów odporności swoistej.



? Czy zniszczenie komórek fagocytujących miałoby wpływ na funkcjonowanie układu odpornościowego?

1. Fagocytoza obcej komórki (antygenu)
2. Połączenie fagosomu i lizosomu
3. Enzymy rozkładają obcą komórkę
4. Obca komórka zostaje rozłożona na fragmenty
5. Fragmenty antygenu prezentowane na powierzchni komórki
6. Pozostałości komórki obcej zostają usunięte w drodze egzocytozy

38.3. Fagocytoza obcych komórek pozwala określić skład ich antygenów powierzchniowych.

Swoiste mechanizmy obronne

Swoiste mechanizmy obronne są znacznie młodsze od nieswoistych pod względem filogenetycznym. Rozwinięcie pełnej odpowiedzi immunologicznej o charakterze swoistym jest procesem długotrwałym, jednak opłacalnym. Trzecia linia obrony jest bowiem skierowana przeciwko konkretnym antygenom. Stanowią ją wyspecjalizowane agranulocyty – limfocyty B i T.

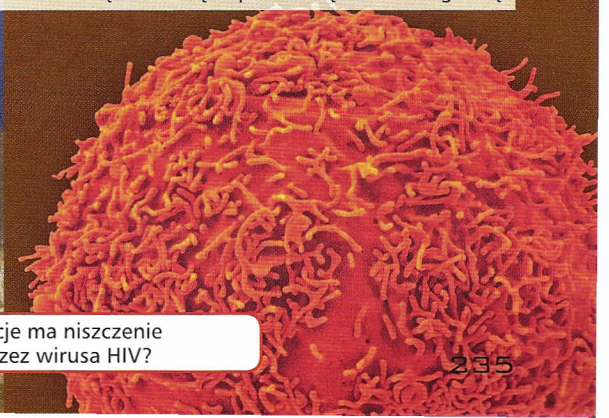
:: Ciekawostka

Bakteria *Helicobacter pylori*, odpowiedzialna za rozwój choroby wrzodowej żołądka, doskonale radzi sobie z niskim pH soku żołądkowego. Z mocznika przez nią rozkładanego uwalniają się duże ilości amoniaku. Wykazuje on silne właściwości zasadowe i zobojętnia środowisko w bezpośrednim sąsiedztwie rozwijających się komórek bakterii.

38.4. Limfocyt B potrafi za pomocą przeciwciał skutecznie unieszkodliwić każdy antygen.



38.5. Limfocyty T stanowią pomost pomiędzy nieswoistą a swoistą odpowiedzią immunologiczną.



? Jakie konsekwencje ma niszczenie limfocytów Th przez wirusa HIV?

Limfocyty B są genetycznie zaprogramowane do rozpoznawania antygenów, na które organizm może się teoretycznie natknąć **(38.4.)**. Gdy taki antygen zostanie odnaleziony w ustroju (rozpoznany), limfocyty B dzielą się bardzo intensywnie i przekształcają w tak zwane **komórki plazmatyczne**. Wytwarzają one olbrzymią ilość przeciwciał, które są w stanie specyficznie związać antygen obecny w ustroju.

Limfocyty T powstają w szpiku kostnym, a dojrzewają w **grasicy** (łac. *thymus*) **(38.5.)**. Ze względu na rolę, jaką odgrywają w układzie immunologicznym, wyróżnia się kilka ich rodzajów. Jednym z nich są **limfocyty Th** (pomocnicze, z ang. *helper*), które współpracują z limfocytami B w rozpoznawaniu antygenów lub z komórkami żernymi, zwiększając skuteczność nieswoistej odpowiedzi immunologicznej. Z kolei **limfocyty Tc** (cytotoksyczne) rozpoznają i niszczą komórki zakażone przez wirusy lub inne patogeny wewnątrzkomórkowe. Jeszcze inna grupa limfocytów T w momencie pokonania patogenu i ustania procesu chorobowego wycisza odpowiedź immunologiczną. Jej przedłużanie byłoby bowiem zbędnym wysiłkiem dla organizmu.

PODSUMOWANIE

- Nauka o odporności to immunologia.
- Antygen to substancja wzbudzająca odpowiedź ze strony układu immunologicznego oraz zdolna do wiązania skierowanych przeciw sobie przeciwciał.
- Przeciwciała to białka wydzielane przez aktywowane limfocyty B (komórki plazmatyczne).
- Zadaniem przeciwciał jest rozpoznanie i unieszkodliwienie antygenu.
- Podstawowy podział wyróżnia odporność nieswoistą oraz swoistą.
- Odporność swoista może być naturalna lub sztuczna, obie uzyskane mogą być przez organizm na drodze czynnej lub biernej.
- Nieswoiste mechanizmy immunologiczne tworzą pierwszą i drugą linię obrony.
- Pierwszą linię obrony stanowią bariery fizyczne i chemiczne: nieuszkodzona skóra, żołądek, pochwa, spojówka oka.
- Organizm potrafi również mechanicznie usuwać drobnoustroje, które wniknęły do jego wnętrza (za pomocą kaszlu lub kichania).
- Druga linia obrony obejmuje komórki żerne (monocyty, makrofagi oraz neutrofile).
- Swoiste mechanizmy obronne wykorzystują limfocyty T oraz limfocyty B, które po przekształceniu się w komórki plazmatyczne produkują przeciwciała.

ZADANIA

1. Zdefiniuj pojęcie antygenu i przeciwciała.
2. Scharakteryzuj elementy tworzące pierwszą, nieswoistą linię obrony organizmu przed patogenami.
3. Oceń znaczenie fagocytozy w rozwoju swoistej odpowiedzi immunologicznej.
4. Przeanalizuj sposób wykształcania swoistej odpowiedzi immunologicznej oraz udowodnij jej przewagę nad niespecyficznymi mechanizmami obrony.

BIBLIOGRAFIA

- Jakóbisiak M., Gołąb J., Lasek W. (red. nauk.), *Immunologia*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009.
- Roitt I., Brostoff J., Male D., *Immunologia*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL – Wydawnictwo Medyczne Słotwiński Verlag, Warszawa–Bremen 2000.

W INTERNECIE

- http://www.resmedica.pl/immunologia-1
- http://humanhealth.pl/category/odpornosc/

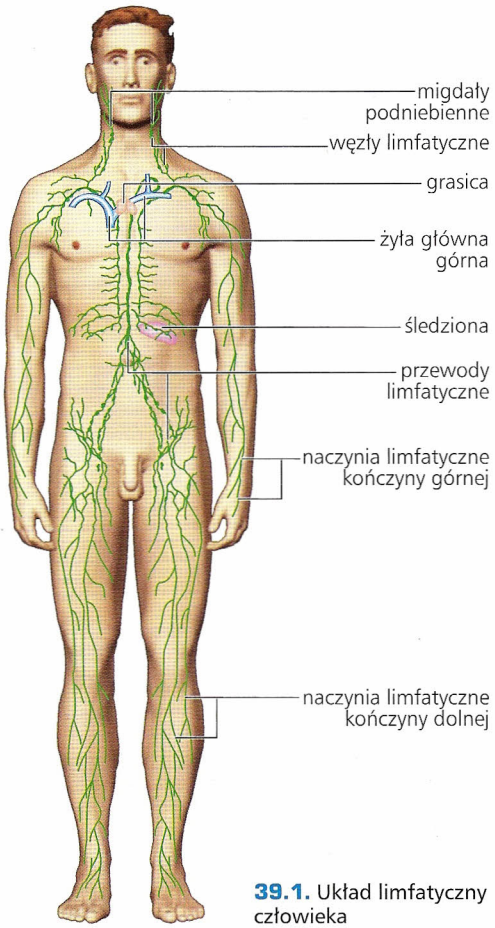
39. Reakcje odpornościowe

Miejsce wniknięcia oraz rodzaj patogenu mają wpływ na to, jaki typ odpowiedzi immunologicznej zostanie uruchomiony i będzie skuteczny. Istnieje duża grupa **patogenów wewnątrzkomórkowych** (do komórek wnikają wszystkie wirusy, niektóre bakterie i pierwotniaki). Aby je zlikwidować, **układ odpornościowy** musi zniszczyć zakażone komórki własnego organizmu. Z kolei **patogeny zewnątrzkomórkowe**, namnażające się w płynach tkankowych lub tkankach, są znacznie łatwiejszym celem dla mechanizmów odpornościowych. Równocześnie jednak bardzo szybko się namnażają, co prowadzi w wielu wypadkach do przełamania barier immunologicznych i rozwoju procesu chorobowego.

Układ limfatyczny i jego rola w odporności

Układ limfatyczny (chłonny) jest funkcjonalnie powiązany z układem krwionośnym. Mimo olbrzymiej ilości naczyń włosowatych krew nie jest w stanie dotrzeć do każdej komórki organizmu, dlatego między krwią a tkankami pośredniczy płyn tkankowy nazywany **limfą** (lub **chłonką**). W przeciwieństwie do krwi omywa ona bezpośrednio wszystkie komórki w tkankach, do których dociera. Na większe odległości limfa przemieszcza się za pomocą niezwykle cienkich **naczyń limfatycznych**, które są wyposażone w zastawki (dlatego chłonka płynie w jednym kierunku). Mięśnie kurczące się w pobliżu tych naczyń umożliwiają przepływ limfy, jako że w układzie chłonnym nie występuje mięsień napędowy w postaci serca. Chłonka jest filtrowana i po oczyszczeniu trafia do układu krwionośnego. Jest tak, ponieważ układ limfatyczny człowieka jest układem otwartym: chłonka w nim nie krąży, a największe naczynie limfatyczne (przewód piersiowy) uchodzi do jednej z żył.

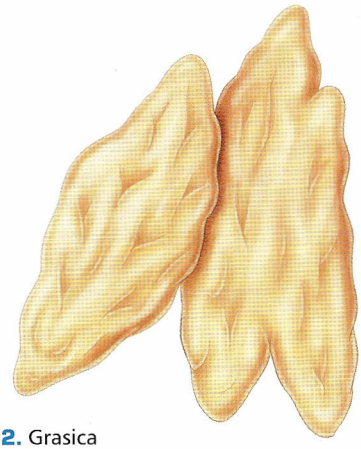
Pod względem funkcjonalnym układ limfatyczny składa się z **narządów limfatycznych**, naczyń limfatycznych oraz z limfocytów krążących. Do narządów limfatycznych zalicza się: **grasicę**, **węzły chłonne**, **szpik kostny**, **śledzionę** oraz **migdałki** (39.1.).



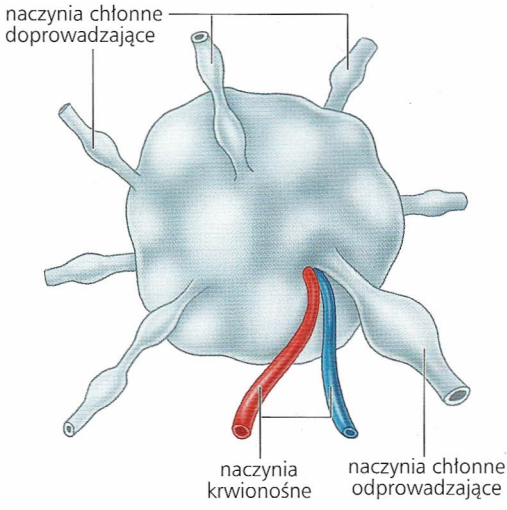
39.1. Układ limfatyczny człowieka

Grasica

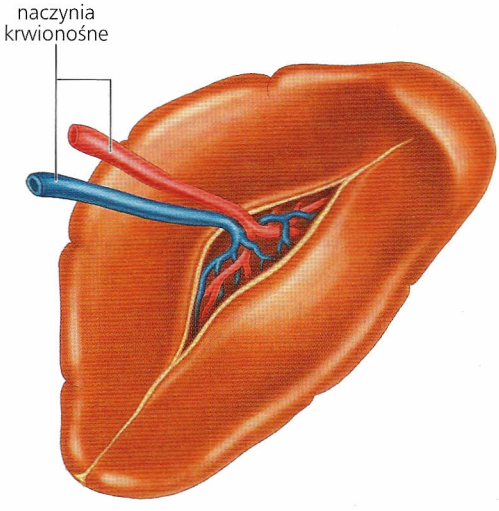
To najważniejszy narząd układu limfatycznego, który odgrywa kluczową rolę w dojrzewaniu limfocytów T oraz w nabywaniu przez nie kompetencji w rozpoznawaniu antygenów (39.2.). Dlatego grasicę i szpik kostny określa się wspólnie jako centralne narządy limfatyczne (dla odróżnienia od narządów obwodowych). W przeciwieństwie do pozostałych narządów limfatycznych grasica jest w pełni ukształtowana zaraz po urodzeniu. Maksymalną masę (rzędu 25 g) osiąga około 2. roku życia. Po okresie dojrzewania zaczyna się stopniowo zmniejszać (po 60. roku życia jej masa wynosi ok. 0,5 g). Gdy limfocyty znajdujące się w grasicy nabędą kompetencji do rozpoznawania i reakcji na obce antygeny, wydostają się z grasicy, przemieszczają w kierunku obwodowych naczyń



39.2. Grasica



39.3. Budowa węzła chłonnego



39.4. Budowa śledziony

i innych narządów limfatycznych. Te limfocyty, które nie nabyły zdolności rozpoznawania obcych antygenów i tolerowania własnych znajdujących się na powierzchni komórek, są eliminowane.

Węzły chłonne (limfatyczne)

Są to niewielkie (średnicy ok. 2–3 cm) narządy zbudowane z tkanki łącznej **(39.3.)**. Stanowią element układu limfatycznego zajmujący się filtracją przepływającej przez nie chłonki, zanim wróci ona przewodem piersiowym do krwioobiegu. Węzły chłonne są najczęściej zlokalizowane w rozgałęzieniach naczyń limfatycznych, w sąsiedztwie narządów wewnętrznych i głównych naczyń krwionośnych. Pełnią w organizmie ważną funkcję odpornościową, ponieważ znajdują się w nich olbrzymie populacje limfocytów B, limfocytów T oraz komórki plazmatyczne i makrofagi. Wytwarzane w węzłach chłonnych komórki układu odpornościowego migrują do innych obszarów ciała za pośrednictwem naczyń limfatycznch lub wnikających do węzła naczyń krwionośnych. Węzły chłonne powiększają się podczas infekcji bakteryjnej. Obrzęk ten jest następstwem stanu zapalnego.

Śledziona

To narząd o wydłużonym kształcie, zlokalizowany po lewej stronie ciała, między przeponą a żołądkiem **(39.4.)**. Główne zadania śledziony to rozkład erytrocytów oraz namnażanie limfocytów.

:: Ciekawostka

Śledziona odgrywa rolę zapasowego zbiornika krwi dzięki temu, że jest elastyczna i może znacznie się rozciągać. Krew zmagazynowana w jej zatokach zostaje wykorzystana podczas zwiększonego wysiłku fizycznego. Przedostaje się ona do naczyń w wyniku skurczu mięśni śledziony, odczuwanych jako kolka (występująca w trakcie intensywnych ćwiczeń, np. biegu).

Migdałki

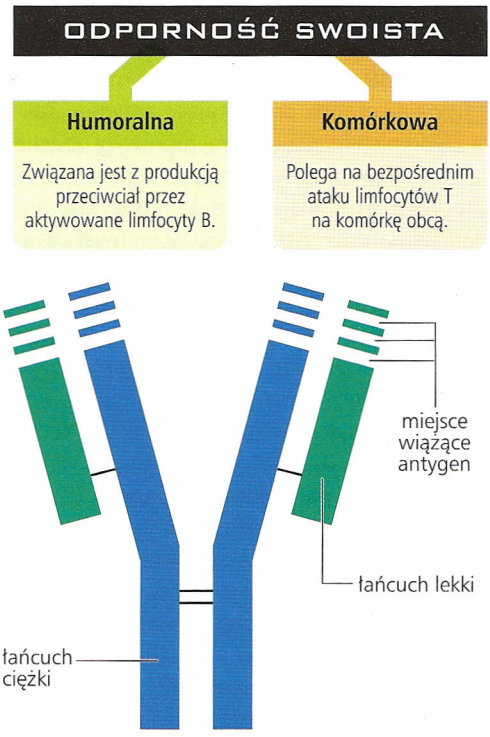
Są to skupiska tkanki limfatycznej zlokalizowane w gardle. Stanowią pierwszą linię obrony przed patogenami dążącymi do zakażenia górnych odcinków dróg oddechowych i przewodu pokarmowego.

Rodzaje odporności swoistej

W poprzednim rozdziale zaprezentowano klasyczny podział na odporność nieswoistą i swoistą oraz szczegółowo omówiono elementy odporności nieswoistej. Ta ostatnia jest znacznie starsza pod względem filogenetycznym od odporności swoistej, której charakterystyczną cechą jest proces zapamiętywana. To dlatego uruchomienie pełnej swoistej odpowiedzi immunologicznej wymaga sporo czasu. Jednak po ponownym kontakcie z antygenem reakcja układu odpornościowego jest o wiele silniejsza i szybsza, a także skierowana selektywnie przeciwko konkretnemu patogenowi. Dzięki temu odporność swoista jest znacznie skuteczniejsza.

Wyróżniono dwa rodzaje odporności swoistej: humoralną i komórkową.

Należy zaznaczyć, że przedstawiony podział ma charakter umowny i rzadko się zdarza, aby w reakcji na dany patogen wykorzystywany był tylko jeden rodzaj odporności. Przeważnie oba uczestniczą w odpowiedzi immunologicznej, a różnica dotyczy jedynie stopnia nasilenia reakcji.



39.5. Budowa przeciwciała

Mechanizmy odporności humoralnej

Ten rodzaj odporności jest związany z wykorzystaniem przeciwciał **(39.5.)**, znajdujących się przede wszystkim we krwi, chłonce, płynach tkankowych oraz wydzielinach śluzowych dróg oddechowych i przewodu pokarmowego. Wszystkie poznane dotąd przeciwciała są białkami, określanymi jako **immunoglobuliny** (ze względu na ich funkcje odpornościowe). Każde przeciwciało zbudowane jest z czerech łańcuchów peptydowych (dwóch ciężkich i dwóch lekkich).

Pod względem strukturalnym i funkcjonalnym występujące w organizmie człowieka immunoglobuliny dzieli się na pięć klas: IgG, IgM, IgA, IgE oraz IgD. Różnią się one nieco budową oraz dość znacznie – funkcjami pełnionymi w ustroju.

Klasy immunoglobulin występujących w organizmie człowieka

Klasa przeciwciała	Pełniona funkcja
IgG	Najlepiej poznana klasa przeciwciał (stanowią blisko 80% wszystkich przeciwciał surowicy); uczestniczą we wtórnej odpowiedzi immunologicznej.
IgM	Ten typ przeciwciał jest syntetyzowany jako pierwszy w rozwoju osobniczym (wczesna odpowiedź immunologiczna); ze względu na wielkość słabo dyfundują do płynu tkankowego.
IgA	Przeciwciała obecne w pocie, łzach oraz śluzie wydzielanym przez układy oddechowy i pokarmowy; w dużej ilości obecne są w mleku matki, gdzie pełnią funkcję pierwszych, osłonowych przeciwciał dla noworodka.
IgD	Najmniej poznany typ immunoglobuliny; są zlokalizowane na powierzchni limfocytów B i najprawdopodobniej odgrywają rolę w ich aktywacji po związaniu antygenu.
IgE	Wiążą się z receptorem na powierzchni bazofili i komórek tucznych, w związku z tym biorą udział w rozwoju reakcji alergicznych.

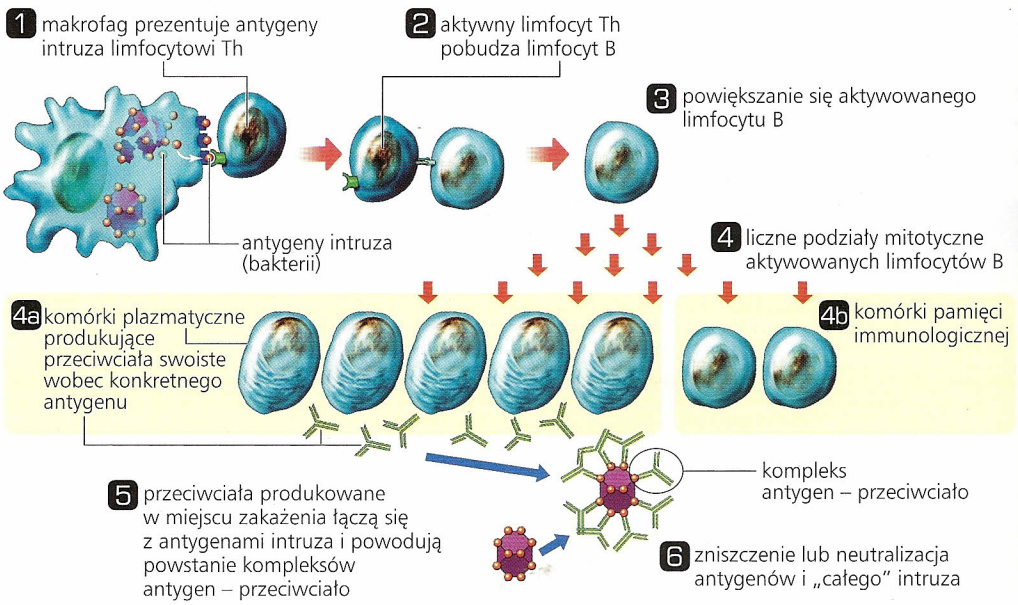
Produkcja przeciwciał skierowanych swoiście przeciwko konkretnemu antygenowi rozpoczyna się, gdy pobudzi on układ odpornościowy do działania (39.6.). Ważną rolę w tym procesie odgrywają komórki prezentujące antygen. Zalicza się do nich między innymi monocyty obecne we krwi, makrofagi obecne w tkankach oraz limfocyty B. Komórki zdolne do fagocytozy pochłaniają patogen i trawią go w typowej wodniczce pokarmowej. Pozostałe po nim antygeny są następnie umieszczane na powierzchni tych komórek i udostępniane limfocytom T (stąd nazwa: komórki prezentujące antygen). Dzięki temu limfocyty T, gdy przyłączają się do komórki prezentującej, rozpoznają unikalne cechy antygenów.

Uaktywniony pomocniczy limfocyt T (limfocyt Th) za pomocą wydzielanych przez siebie białek (zaliczanych do tzw. cytokin) pobudza te limfocyty B, które produkują przeciwciała zdolne rozpoznać określony antygen. Aktywowane limfocyty B powiększają znacznie swoje rozmiary i przechodzą kolejne podziały mitotyczne, co w krótkim czasie prowadzi do zwielokrotnienia ich populacji. Określa się je jako **komórki plazmatyczne**. Niewielka część komórek plazmatycznych przechodzi w stan uśpienia i staje się **komórkami pamięci immunologicznej**. Mogą one zostać szybko aktywowane, gdyby w przyszłości doszło do ponownej ekspozycji na dany antygen.

Gdy przeciwciało rozpozna swoiście antygen i połączy się z nim swoim regionem wiążącym, uruchomione zostają reakcje, które prowadzą do usunięcia lub unieszkodliwienia patogenu. Obce komórki oraz toksyny i wirusy, które utworzyły kompleksy antygen – przeciwciało, mogą zostać w łatwy sposób sfagocytowane lub zniszczone przy udziale białek układu dopełniacza.

Mechanizmy odporności komórkowej

Odporność komórkowa to reakcja wykorzystująca limfocyty cytotoksyczne (tzw. limfocyty Tc). Są one zdolne do uśmiercenia dowolnej komórki mającej na swojej powierzchni antygen rozpoznany jako obcy. Mogą to być na przykład komórki organizmu zakażone przez wirusy lub komórki nowotworowe. Podobne działanie wykazują również komórki określane jako NK (ang. *Natural Killers*). Oba wymienione typy komórek wydzielają substancje chemiczne, które tworzą otwory w błonie komórki docelowej oraz prowadzące do uruchomienia indukowanej śmierci komórki (apoptozy). Na skutek śmierci zakażonej komóki patogen traci miejsce do rozmnażania, staje się poza tym dostępny dla przeciwciał.



39.6. Schemat wytwarzania przeciwciał

Szczepionki

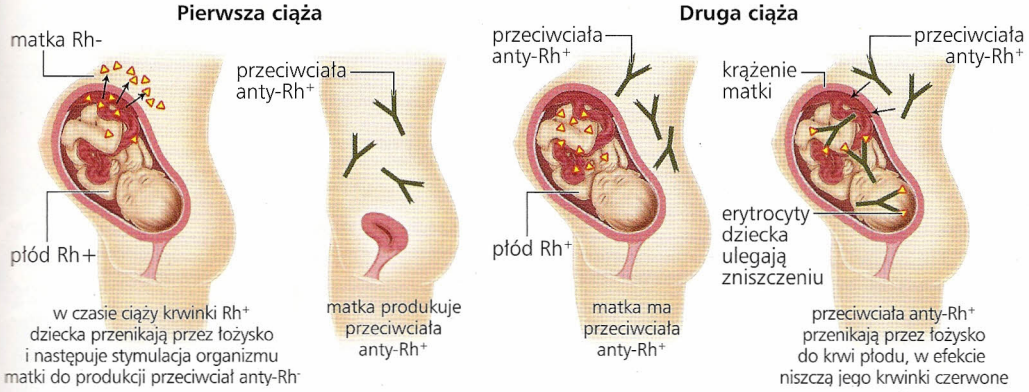
Są to preparaty zawierające obce antygeny (np. pochodzące z bakterii chorobotwórczej). Po wprowadzeniu szczepionki do organizmu układ odpornościowy rozpoznaje podany antygen jako obcy i uruchamia mechanizmy prowadzące do wytworzenia skierowanych przeciwko niemu swoistych przeciwciał. Po pewnym czasie następuje całkowita eliminacja antygenów zawartych w szczepionce, jednak pobudzone do produkcji przeciwciał limfocyty B są już obecne. Część z nich przekształca się w komórki pamięci immunologicznej, co pozwala chronić organizm natychmiast w momencie pojawienia się realnej infekcji.

Pierwszymi szczepionkami były po prostu żywe mikroorganizmy o obniżonej zjadliwości (istniało wówczas ryzyko wystąpienia objawów chorobowych), współcześnie stosowane nowoczesne szczepionki (tzw. podjednostkowe) zawierają tylko antygeny powierzchniowe mikroorganizmu. W przypadku szczepionek podjednostkowych nie istnieje ryzyko rozwoju procesu chorobowego.

Choroba hemolityczna noworodka

Choroba ta określana jest potocznie jako **konflikt serologiczny** (39.7.). U jej podłoża leży silna reakcja układu odpornościowego matki na antygeny obecne we krwi płodu. Do sytuacji tej dochodzi, gdy matka mająca grupę krwi Rh^- urodzi dziecko z grupą Rh^+ (odziedziczoną po ojcu). Przyczyną wystąpienia konfliktu serologicznego jest brak szczelności łożyska płodowego. Teoretycznie krew matki i krew dziecka nie mieszają się ze sobą, jednak w praktyce w czasie dziewięciu miesięcy ciąży może dojść do drobnych przecieków (najczęściej dopiero w trakcie porodu). Dostające się wówczas do krwioobiegu matki krwinki dziecka (zawierające na swojej powierzchni czynnik Rh) działają stymulująco na jej układ odpornościowy. Rozpoczyna on produkcję przeciwciał skierowanych przeciwko czynnikowi Rh.

Stymulacja układu odpornościowego matki podczas pierwszej ciąży zwykle nie powoduje powikłań, ponieważ poród następuje, zanim dobiegnie końca długotrwały proces selekcji i dojrzewania limfocytów B produkujących przeciwciała. Dlatego też pierwsze dziecko najczęściej nie odczuwa skutków konfliktu serologicznego. Problem pojawia się przy drugim dziecku, na które przez cały okres rozwoju płodowego działają przeciwciała matki. Ze względu na małą masę są one w stanie przeniknąć przez łożysko i niszczyć czerwone krwinki dziecka. Efektem tego jest głęboka niedokrwistość, która może prowadzić do zahamowania rozwoju płodu, a nawet do poronienia. Aby zapobiegać szkodliwym konsekwencjom konfliktu serologicznego, zaraz po porodzie podaje się kobiecie surowicę odpornościową. Zawiera ona przeciwciała anty-Rh, które niszczą znajdujące się w jej krwioobiegu erytrocyty Rh^+ dziecka, zanim jeszcze organizm matki zdąży na nie zareagować.



39.7. Schematyczny przebieg reakcji związanych z konfliktem serologicznym

? Dlaczego kobiecie podaje się surowicę odpornościową dopiero po urodzeniu dziecka?

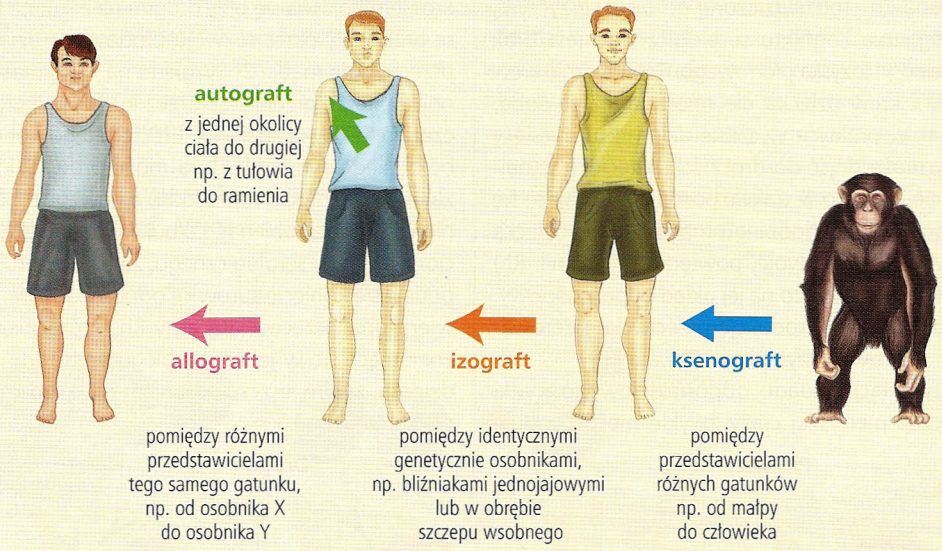
Zgodność tkankowa

Zgodność tkankowa to cecha każdego żywego organizmu. Wiąże się ona z rozpoznawaniem przez układ odpornościowy narządów jako elementów własnego organizmu. W praktyce zgodność tkankowa najważniejszą rolę odgrywa w transplantologii (bariery transplantacyjne polegają na niezgodności genetycznej pomiędzy dawcą i biorcą). Można wyróżnić cztery typy przeszczepów różniące się stopniem zgodności tkankowej.

Za odrzucenie przeszczepu odpowiadają **antygeny zgodności tkankowej** zlokalizowane na powierzchni niemal wszystkich komórek (wyjątkiem jest np. tkanka mięśniowa poprzecznie prążkowana serca). Liczba tych antygenów jest duża (ponad 30), choć nie wszystkie powodują odrzucenie przeszczepu z jednakową siłą. Największe znaczenie mają wielobiałkowe cząsteczki **MHC** (ang. *Major Histocompatibility Complex* – **główny kompleks zgodności tkankowej**). Cechuje je silna antygenowość, co sprawia, że wyposażone w nie komórki w przypadku braku zgodności bardzo szybko są rozpoznawane jako obce. Dlatego też dopasowanie białek MHC ma kluczowe znaczenie w doborze dawcy i biorcy przeszczepu. Im większa niezgodność, tym szybciej nastąpi proces odrzucenia przeszczepu prowadzony za pomocą cytotoksycznych limfocytów Tc. Aby temu zapobiegać, po każdym zabiegu transplantacji konieczne jest przyjmowanie środków immunosupresyjnych, nawet jeśli dawcą była osoba blisko spokrewniona (np. rodzic).

:: Ciekawostka

Rodzaje przeszczepów.



Alergie

Alergia (inaczej: nadwrażliwość) to patologiczna reakcja organizmu na potencjalnie niegroźny czynnik nazywany **alergenem**. Zawiera on antygeny, które powodują **uczulenie**. Reakcja alergiczna nie zwiększa poziomu ochrony organizmu, lecz prowadzi do uszkodzenia tkanek. Łagodne stany alergiczne nie są groźne (objawiają się np. w postaci kataru siennego), natomiast silniejsze mogą nawet zagrażać życiu (jak np. tzw. wstrząs anafilakyczny). Najczęściej jednak reakcja alergiczna ogranicza się do intensywnego, wodnistego kataru, zatkanego nosa, napadów kichania. Do tych objawów często dołączają: zapalenie spojówek oka, bóle głowy, napady duszności oraz wysypka, będąca manifestacją alergii kontaktowej.

Mechanizm powstawania reakcji alergicznej

Aby doszło do uczulenia organizmu na dany antygen (zwany alergenem), układ odpornościowy musi się z nim zetknąć. W wyniku tego kontaktu uaktywniają się limfocyty B. Niektóre produkowane przez nie przeciwciała mają zdolność wiązania się do komórek tucznych (mastocytów), znajdujących się w tkance łącznej i błonach śluzowych. Gdy związane z powierzchnią komórek tucznych przeciwciała ponownie połączą się z alergenem, dochodzi do aktywacji tych komórek. W wyniku tego następuje ich degranulacja, czyli uwolnienie zawartości wszystkich pęcherzyków obecnych w cytoplazmie. Pęcherzyki te zawierają głównie **histaminę**, zwiększającą przepuszczalność ścian naczyń włosowatych. Efektem zwiększenia ich przepuszczalności są: katar sienny, kichanie, łzawienie oczu, obrzęk błon śluzowych.

Kategorie alergenów

Alergeny to olbrzymia grupa związków i substancji mogących wywoływać reakcje uczuleniowe. Pod względem drogi wnikania do organizmu dzieli się je na:

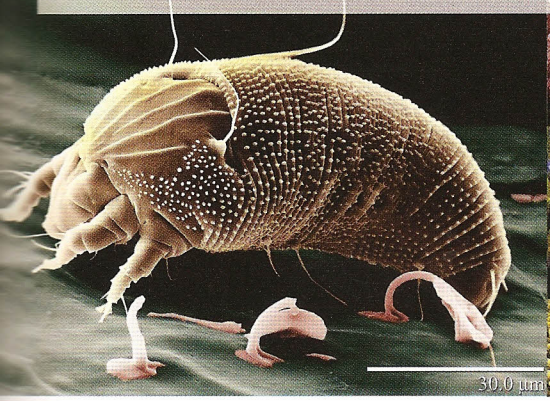
- **wziewne**, które dostają się do organizmu z wdychanym powietrzem (jak kurz, szczątki roślinne i zwierzęce, roztocza);
- **pokarmowe** – dostające się do organizmu ze spożywanym pokarmem (jak białko mleka krowiego, albumina jaja kurzego – owoalbumina, czy gluten obecny w produktach zbożowych);
- **kontaktowe**, które odpowiadają za wszelkiego typu reakcje skórne (jak lateks, owoce, produkty organiczne).

Najczęstsze alergeny

Człowiek może wykształcić alergiczną nadwrażliwość w zasadzie na każdy rodzaj substancji. Są jednak wśród nich takie, które wywołują uczulenia znacznie częściej od innych. Należą do nich:

- roztocza – właściwości alergizujące wykazują nie same pajęczaki, ale białkowe enzymy jelitowe obecne w ich odchodach oraz białka tkanek **(39.8.)**; roztocza odpowiadają też za alergiczne właściwości kurzu (dlatego mówi się, że ktoś jest uczulony na „roztocze kurzu domowego");
- pyłki roślin są typową przyczyną alergii sezonowej, obejmującej okres od marca do października; najczęściej uczulają pyłki traw, ale objawy nadwrażliwości mogą być powodowane także przez pyłki bylicy, piołunu, pokrzywy, komosy, olchy, wierzby, lipy, topoli czy leszczyny **(39.9.)**;
- sierść zwierzęca – powoduje jedną z najczęstszych alergii, dotyczy to zwłaszcza sierści i złuszczającego się naskórka kotów oraz psów, w wypadku kotów dużą rolę odgrywa też alergen wytwarzany przez skórne gruczoły łojowe oraz przez gruczoły ślinowe;
- arachidy – białka zawarte w orzechach arachidowych. Potrafią wywołać bardzo silne objawy uczuleniowe przy kontakcie nawet ze śladową ilością alergenu. Reakcja najczęściej przyjmuje postać pokrzywki, napadu astmy lub biegunki. Niekiedy może dojść do wstrząsu anafilaktycznego stanowiącego bezpośrednie zagrożenie życia.

39.8. Roztocze żyjące pośród cząstek kurzu



39.9. Obraz pyłków roślin uzyskany za pomocą mikroskopu skaningowego



PODSUMOWANIE



- Układ limfatyczny jest nierozerwalnie powiązany z układem krwionośnym, odgrywa jednocześnie kluczową rolę w reakcjach odpornościowych.
- Na układ limfatyczny składają się narządy limfatyczne (grasica, węzły chłonne, szpik kostny, śledziona, migdałki), naczynia limfatyczne oraz krążące limfocyty.
- Grasica jest centralnym narządem limfatycznym, w którym limfocyty T nabierają kompetencji, czyli zdolności do rozpoznawania obcych i tolerancji własnych antygenów.
- Węzły chłonne są miejscem koncentracji limfocytów T i B, a ich zadaniem jest stała filtracja chłonki (limfy) przez nie przepływającej.
- Śledziona położona w lewej części nadbrzusza odpowiada za rozkład erytrocytów i namnażanie limfocytów.
- Odporność swoista może mieć charakter humoralny (związany z wytwarzaniem przeciwciał) lub komórkowy (związany z bezpośrednimi reakcjami limfocytów przeciw zakażonym komórkom organizmu).
- Przeciwciała, stanowiące główny czynnik odporności humoralnej, to białkowe cząstki zdolne rozpoznawać obce antygeny.
- W realizacji odporności komórkowej biorą udział wyspecjalizowane limfocyty Tc (cytotoksyczne) oraz komórki NK.
- Rozpoznawanie antygenów ma szczególne znaczenie w transplantologii.
- W reakcjach alergicznych potencjalnie niegroźny czynnik (tzw. alergen) wywołuje nadmierną odpowiedź immunologiczną organizmu.
- Najważniejszą rolę w rekcjach alergicznych odgrywają komórki tuczne, które w wyniku związania alergenu uwalniają histaminę, co prowadzi do pojawienia się lokalnego obrzęku.
- Wyróżnia się trzy kategorie alergenów: wziewne, pokarmowe i kontaktowe.
- W roli alergenów najczęściej występują: roztocza, pyłki roślin oraz sierść zwierząt.

ZADANIA



1. Określ rolę grasicy w ustroju i oceń, jaki wpływ na funkcjonowanie układu odpornościowego w podeszłym wieku ma jej stopniowa degeneracja.
2. Określ rolę komórek prezentujących antygen (APC) w rozwoju odporności humoralnej.
3. Omów mechanizmy prowadzące do wytworzenia komórek pamięci immunologicznej.
4. Scharakteryzuj tak zwaną odpowiedź późną.
5. Omów reakcje zachodzące w czasie konfliktu serologicznego.
6. Wyjaśnij rolę białek MHC w transplantologii.
7. Omów mechanizm powstawania pokrzywki w przebiegu reakcji alergicznych.

BIBLIOGRAFIA



- Ptak W., *Podstawy Immunologii*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2009.
- Cheung T., *100 sposobów na zwiększenie odporności*, Helion, 2010.
- Michajlik A., Ramotowski W., *Anatomia i fizjologia człowieka*, PZWL, Warszawa 2007.

W INTERNECIE



- http://www.drugiezycie.org/kat/id/148
- http://transplantologia.edu.pl/
- http://www.alergik24.pl/

40. Zaburzenia funkcji układu odpornościowego

Zaburzenia funkcji układu odpornościowego wiążą się nierozerwalnie ze zjawiskiem **choroby**. Niewystarczająco efektywne działanie tego układu jest szczególnie niebezpieczne, gdyż potencjalnie nieszkodliwe mikroorganizmy mogą stać się śmiertelnym zagrożeniem. Tak jest w przypadku AIDS. W odróżnieniu od innych infekcji zakażenie HIV wciąż jest odbierane jako wyrok śmierci. Okazuje się jednak, że stosowane obecnie metody leczenia pozwalają przedłużyć życie pacjentów, chronią również przed pojawieniem się chorób towarzyszących **(40.1.)**. Oprócz niewystarczająco aktywnego działania układu odpornościowego, niebezpieczne jest także atakowanie przez niego tkanek organizmu, jak ma to miejsce w chorobach autoimmunizacyjnych.

Niedobory odporności – AIDS

Obecnie HIV należy do najlepiej poznanych wirusów na świecie, a w badaniach nad mechanizmami rozwoju tej choroby widać z każdym rokiem znaczący postęp. Ich wyniki wskazują, że wirus odznacza się niebywałą zmiennością, mogącą ujawniać się nawet u jednego pacjenta na różnych etapach rozwoju choroby.

W trakcie wieloletnich badań ustalono, że pierwotnie wirus HIV występował u szympansów (*Pan troglodytes*) oraz mangab rudoczelnych (*Cercocebus torquatus*) **(40.2.)**. Z nich przeniósł się na człowieka.

Sposoby transmisji wirusa

Badania epidemiologiczne prowadzone od lat osiemdziesiątych XX wieku wskazują, że istnieją cztery najważniejsze drogi szerzenia się wirusa HIV w populacji ludzkiej.

1. **Zakażenia wśród narkomanów**, będące skutkiem wykonania przez różne osoby licznych iniekcji narkotyku z użyciem tej samej zanieczyszczonej krwią igły.
2. **Zakażenia drogą kontaktów seksualnych**, wynikające z częstych zmian partnerów seksualnych, przy czym stosunek analny odbywany bez zabezpieczeń sprzyja transmisji wirusa o wiele bardziej niż stosunek waginalny.
3. **Zakażenia wertykalne**, będące wynikiem przeniesienia wirusa z matki na dziecko. Ze względu na szczelną wobec wirusa barierę łożyska płodowego rzadko dochodzi do nich w czasie ciąży (największe ryzyko zakażenia dziecka występuje w trakcie porodu, a duże – podczas karmienia piersią).

? Dlaczego u pacjentów w zaawansowanym stadium AIDS dochodzi do rozwoju rzadkich chorób?

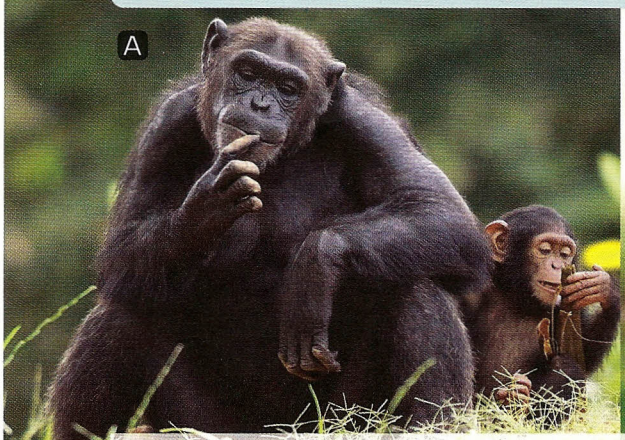


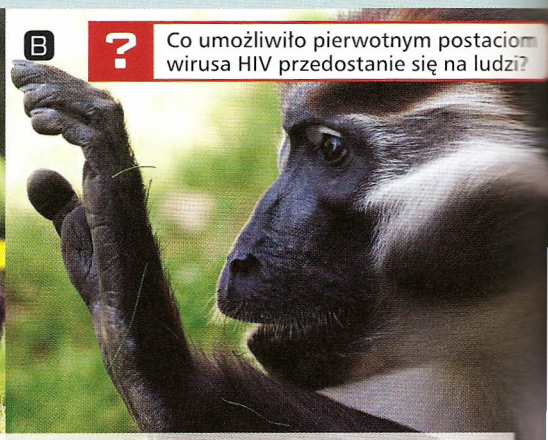
40.1. PCP, czyli zapalenie płuc wywołane przez *Pneumocystis jiroveci*

:: Ciekawostka

Za najstarszy znany przypadek zakażenia człowieka wirusem HIV uznaje się mężczyznę, od którego w 1959 roku pobrano próbkę krwi w Léopoldville, w Kongu Belgijskim (obecnie: Kinszasa, Demokratyczna Republika Konga). Badania nie wykazały sposobu, w jaki doszło do zarażenia.

4. **Transfuzje krwi** są obecnie drogą transmisji wirusa o marginalnym znaczniu. Ocenia się, że w trakcie operacji, podczas których konieczne jest przetoczenie krwi, dochodzi do przeniesienia wirusa w jednym na 2–3 miliony przypadków.





40.2. Prawdopodobne pierwotne rezerwuary wirusa HIV: szympansy (A) i mangaby rudoczelne (B)

Budowa wirusa HIV

Zewnętrzną część kulistej cząsteczki wirionu HIV stanowi dwuwarstwowa lipoproteinowa otoczka, w której zakotwiczone są charakterystyczne dla tego wirusa glikoproteiny. Poza nimi w zewnętrznej osłonce znajdują się też białka niekodowane przez genom wirusa, lecz pochwycone z komórki gospodarza w czasie uwalniania się wirionu w procesie egzocytozy. Wnętrze cząstki wirusa HIV zajmuje cylindryczny kapsyd. Wewnątrz kapsydu zlokalizowane są dwie pojedyncze nici RNA, a także enzymy, w tym **odwrotna transkryptaza**.

Fazy zakażenia

Wyróżnia się trzy fazy zakażenia HIV: (1) pierwotne zakażenie, (2) faza bezobjawowa (przewlekła), (3) faza objawowa – AIDS.

Pierwotne zakażenie HIV

Obejmuje czas od ekspozycji na wirusa (moment zakażenia) do chwili pojawienia się przeciwciał skierowanych swoiście przeciwko wirusowi. Zwykle następuje to od 10 do 14 dni po zakażeniu. Wirus w pierwszej fazie zaraża stosunkowo niewiele komórek. Atakuje wówczas m.in. makrofagi oraz limfocyty Th, czyli komórki mające na swojej powierzchni antygen CD4. Do objawów obserwowanych tuż po zakażeniu (o ile występują) należą: gorączka, wysypka na twarzy i tułowiu oraz zapalenie gardła, bóle mięśniowo-stawowe przypominające grypę, a także biegunka i nawracające bóle głowy.

Faza bezobjawowa (przewlekła)

Po wystąpieniu objawów opisanych powyżej następuje pozorna poprawa stanu zdrowia. W rozpoczynającej się fazie przewlekłej wirus intensywnie zaraża kolejne komórki (liczba cząstek wirusowych uwalnianych na dobę może wynosić ponad 1 mld). W wyniku częstych mutacji wirus staje się niezwykle zróżnicowany. Jest tak, ponieważ podczas odwrotnej transkrypcji pojawia się duża liczba błędów (od 1 do 10 na genom!). Na masową skalę niszczone są komórki wyposażone w antygen CD4. Organizm początkowo stara się kompensować ich stratę nadprogramową produkcją, jednak po pewnym czasie przegrywa walkę o utrzymanie prawidłowego ich poziomu. Ofiarą wirusa padają głównie limfocyty Th, które odpowiadają za powiązanie odporności nieswoistej z odpornością swoistą. Bez nich, w ciągu

:: Ciekawostka

Pomimo obiegowych opinii wirus HIV nie powstał w laboratorium, gdyż nawet dzisiejszy poziom rozwoju inżynierii genetycznej (nie mówiąc już o latach osiemdziesiątych XX wieku) nie umożliwia takich manipulacji. Świadczy o tym również fakt istnienia dwóch odmian wirusa (HIV I i HIV II), powstałych niezależnie. Mitem jest również możliwość transmisji wirusa przez owady wyposażone w aparat gębowy kłująco-ssący (kleszcze, komary itp.).

:: Ciekawostka

Szerzeniu się pandemii wirusa znacząco sprzyja zjawisko określane jako promiskuityzm. Polega ono na podejmowaniu częstych kontaktów seksualnych z różnymi, przypadkowymi partnerami.

kilku lat trwania fazy przewlekłej, stopniowo załamuje się cały system rozpoznawania patogenów.

Faza objawowa (AIDS)

Dopiero gdy liczba komórek układu odpornościowego osiągnie krytycznie małą wartość, można mówić wejściu zakażenia HIV w trzecią fazę – objawową, określaną jako AIDS (ang. *Accuired Immunodefficiency Syndrome*). Charakterystyczną cechą tej fazy jest skrajne upośledzenie odporności, prowadzące do rozwoju szeregu chorób, nazywanych oportunistycznymi. Wiele z nich występuje wyłącznie u nosicieli wirusa HIV lub też ma charakterystyczny dla nich przebieg.

Leczenie zakażeń wywołanych wirusem HIV

Nie udało się jak dotąd stworzyć skutecznego leku eliminującego wirusa HIV z ustroju, ale poznanie jego biologii pozwala na produkowanie leków skutecznie hamujących replikacje wirusa (na różnych etapach tego procesu). Należą do nich m.in. **inhibitory odwrotnej transkryptazy** działające na początkowy etap replikacji wirusa, blokując proces przepisywania informacji z wirusowego RNA na nić DNA. Leki mogą również utrudniać wnikanie wirusa do wnętrza komórek (inhibitory fuzji), blokować proces włączania wirusowego DNA do DNA komórki gospodarza (inhibitory integrazy) lub też utrudniać obróbkę białek wirusowych (inhibitory proteazy) **(40.3.)**.

Obecnie stosowana terapia, której celem jest zapobieganie i leczenie objawów AIDS, polega na użyciu kombinacji wielu leków. Leczenie nie eliminuje wirusa z krwioobiegu i tkanek, w których się on znajduje, pozwala jednak utrzymać i odbudować populację limfocytów przez niego atakowanych.

Wybrane choroby oportunistyczne, charakterystyczne dla trzeciej fazy zakażenia HIV

- zapalenie płuc pochodzenia bakteryjnego (powtarzające się przynajmniej dwa razy w roku)
- gruźlica płuc oraz pozapłucna
- rozsiane zakażenie *Mycobacterium avium* (prątki niegruźlicze, atypowe)
- kandydoza przełyku, oskrzeli, tchawicy lub płuc
- zakażenie wirusem opryszczki *Herpes simplex* w postaci owrzodzeń, zapalenia płuc i przełyku
- zakażenie wirusem cytomegalii (poza wątrobą, śledzioną, węzłami chłonnymi)
- toksoplazmoza narządów wewnętrznych

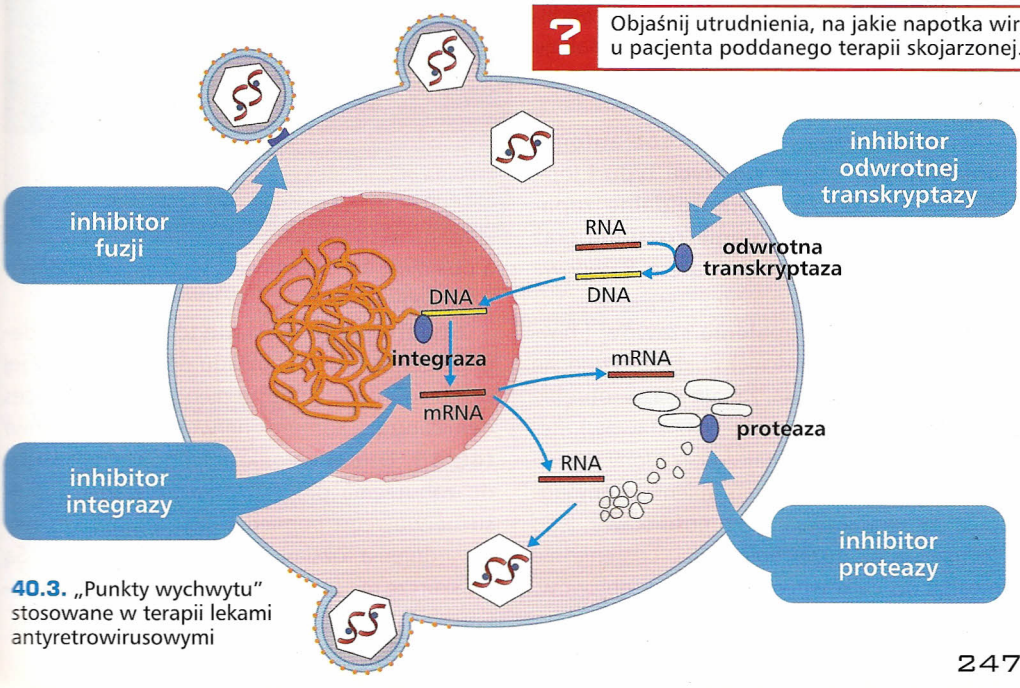
Nowotwory wskazujące na AIDS

- mięsak Kaposiego u mężczyzn poniżej 60. roku życia
- chłoniak Burkitta
- inwazyjny rak szyjki macicy

:: Ciekawostka

Aktualnie proponuje się zmianę statusu AIDS z choroby śmiertelnej na chorobę przewlekłą (jak cukrzyca). Badania o nazwie CHORUS prowadzone w USA na grupie 4524 pacjentów wykazały, że szacunkowy czas przeżycia osoby w wieku 39 lat, będącej w pierwszej lub drugiej fazie zakażenia HIV (liczba limfocytów powyżej 200/μl), wynosi 32 lata.

? Objaśnij utrudnienia, na jakie napotka wirus u pacjenta poddanego terapii skojarzonej.



40.3. „Punkty wychwytu" stosowane w terapii lekami antyretrowirusowymi

Immunosupresja po przeszczepach

Przeszczep narządu (np. płuca czy nerki), nawet mimo bardzo dużej zgodności tkankowej, wiąże się z odpowiedzią ze strony układu immunologicznego. Po transplantacji dowolnego narządu konieczne jest podjęcie natychmiastowego leczenia immunosupresyjnego, które ma na celu osłabienie działania układu odpornościowego i zapobiegnięcie odrzuceniu przeszczepu. Zastosowanie terapii immunosupresyjnej znacznie zwiększa szanse pacjentów na przeżycie (np. po transplantacji płuca 50–64% chorych przeżywa pięć lat). Należy więc mieć nadzieję, że postęp naukowy umożliwi pełne akceptowanie przeszczepianych narządów przez układ immunologiczny.

Białaczka

Jest to rodzaj choroby nowotworowej układu krwiotwórczego. Białaczka rozwija się na bazie komórek układu odpornościowego (leukocytów), u których w wyniku działania czynników zewnętrznych lub wewnętrznych dochodzi do zaburzenia procesu dojrzewania. Zmienione nowotworowo komórki zatrzymują się na pewnym etapie swojego rozwoju, nie są jeszcze zdolne do pełnego rozpoznawania i ignorowania własnych antygenów. Błędy w rozpoznawaniu własnych antygenów skutkują uszkodzeniami narządów wewnętrznych i zaburzeniem odporności swoistej organizmu.

Choroby autoimmunizacyjne

Jest to grupa chorób, w przebiegu których układ immunologiczny niszczy komórki i tkanki własnego organizmu. U podłoża tych schorzeń leży proces nazywany autoimmunizacją. Nabywanie przez komórki odpornościowe kompetencji (czyli zdolności rozpoznawania obcych antygenów) polega na wykształceniu przez nie tolerancji na antygeny własnych komórek. W przypadku reakcji autoimmunologicznych komórki odpornościowe nie nabywają tolerancji w pełni lub też wcale. W konsekwencji wadliwie działający układ odpornościowy atakuje komórki własnego organizmu, ponieważ uznaje je za ciała obce.

Do najczęściej spotykanych **chorób autoimmunizacyjnych** należą: **cukrzyca typu I** (opisana w rozdziale 57.), **reumatoidalne zapalenie stawów**, **stwardnienie rozsiane** oraz **łuszczyca**, a także choroba Gravesa–Basedowa i zapalenie tarczycy Hashimoto.

Reumatoidalne zapalenie stawów (dawniej określane jako gościec) charakteryzuje się przewlekłymi zmianami zapalnymi w obrębie tkanki łącznej (głównie kości oraz stawów). Reakcja zapalna obejmuje najczęściej błony maziowe stawów. W wyniku pogrubienia błony dochodzi do ograniczenia ruchomości stawu, jego deformacji oraz dużej bolesności. Leczenie nie prowadzi do całkowitego ustąpienia objawów, a obejmuje stosowanie leków przeciwzapalnych i zabiegów rehabilitacyjnych.



40.4. Obraz rezonansu magnetycznego mózgu pacjenta z zaawansowaną postacią stwardnienia rozsianego (kolorem zielonym zaznaczono obszary silnej demielinizacji)

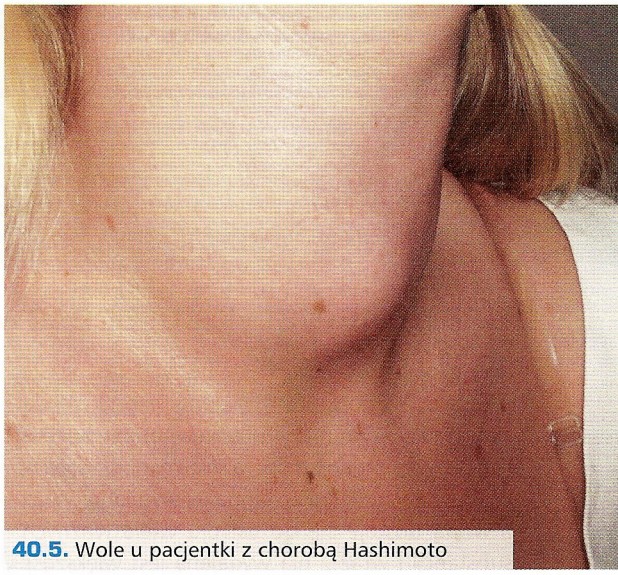
Stwardnienie rozsiane to przewlekła i degeneracyjna choroba układu nerwowego. W jej przebiegu obserwuje się nieodwracalny proces demielinizacji komórek nerwowych (neuronów) **(40.4.)**. Utrata osłonki mielinowej prowadzi do zaburzenia procesu przekazywania impulsu nerwowego pomiędzy neuronami. Objawy stwardnienia rozsianego postępują w czasie. Są to: skurcze mięśni i ich osłabienie, trudności z ko-

ordynacją i utrzymaniem równowagi. Niekiedy u pacjentów występują problemy z mową, wzrokiem, połykaniem. Proces chorobowy można powstrzymać lub spowolnić dzięki odpowiedniej terapii, nie pozwala ona jednak cofnąć objawów chorobowych.

Łuszczyca jest jedną z częstszych chorób skóry. Jej objawami są łuszczące się, czerwone lub brunatne plamy na skórze różnych części ciała.

Choroba Gravesa–Basedowa prowadzi do nadczynności tarczycy. Przeciwciała produkowane omyłkowo przez organizm powodują stymulację tarczycy, co objawia się jej powiększeniem oraz nadmierną produkcją tyroksyny (czyli nadczynnością tarczycy). Choroba Gravesa–Basedowa najczęściej objawia się w postaci wola oraz wytrzeszczem gałek ocznych.

Zapalenie tarczycy Hashimoto to jedna z głównych przyczyn niedoczynności tarczycy **(40.5.)**. Objawami są spowolnienie funkcji motorycznych i psychicznych. Osoby z chorobą Hashimoto są senne i apatyczne. Często pojawia się uczucie zimna, suchej skóry.



40.5. Wole u pacjentki z chorobą Hashimoto

PODSUMOWANIE

- Drogi szerzenia się HIV obejmują (od najważniejszej): zakażenia wśród narkomanów, kontakty homo- i heteroseksualne, zakażenia wertykalne (w czasie porodu), transfuzje krwi.
- W przebiegu zakażenia HIV wyróżnia się trzy fazy: pierwotne zakażenie HIV, fazę bezobjawową (przewlekłą) oraz objawową fazę AIDS.
- Typowymi objawami AIDS są zakażenia oportunistyczne, występują też nowotwory takie jak mięsak Kaposiego.
- W celu obniżenia zdolności obronnych układu odpornościowego w transplantologii stosuje się leczenie immunosupresyjne. Zapobiega ono odrzuceniu przeszczepu.
- Gdy układ immunologiczny działa zbyt aktywnie lub atakuje wybrane komórki i tkanki własnego organizmu (zamiast je chronić), mówi się o autoimmunizacji.
- Do najważniejszych chorób autoimmunizacyjnych należą: cukrzyca typu I, reumatoidalne zapalenie stawów, łuszczyca, stwardnienie rozsiane, choroba Gravesa–Basedowa oraz zapalenie tarczycy Hashimoto.

ZADANIA

1. Scharakteryzuj drogi zakażenia wirusem HIV.
2. Scharakteryzuj metody stosowane w leczeniu HIV.
3. Uzasadnij konieczność stosowania immunosupresji po przeszczepach.
4. Omów znane ci choroby autoimmunizacyjne.

W INTERNECIE

- http://www.aids.gov.pl/
- http://aids.net.pl/
- http://www.stwardnienierozsiane.com/
- http://www.hashimoto.pl/

41. Budowa układu wydalniczego

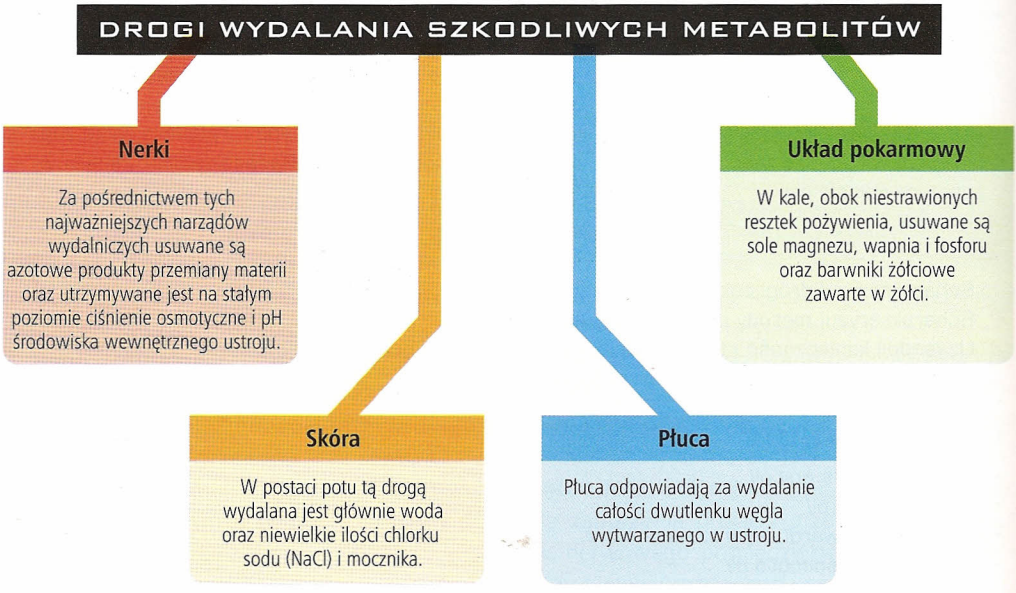
W wyniku zachodzących w komórkach i tkankach przemian metabolicznych powstają substancje chemiczne, których dalszy rozkład lub wykorzystanie przez organizm jest niemożliwe. Ich stężenie może wzrastać jedynie do pewnego poziomu, po którego przekroczeniu wykazują one silne właściwości toksyczne. Aby zapobiegać samozatruciu, w toku ewolucji organizmy żywe wykształciły liczne mechanizmy (nazywane **procesami wydalniczymi**), pozwalające na usuwanie szkodliwych **produktów przemiany materii** poza ustrój.

Charakterystyka procesów wydalniczych

Większość procesów wydalniczych jest ściśle powiązana z gospodarką wodną ustroju. Woda stanowi bowiem środowisko wewnętrzne wszystkich żywych organizmów, a między nimi i środowiskiem zachodzi nieustanna jej wymiana. Wraz z wodą dostaje się do ustroju wiele ważnych substancji i wraz z nią wydalana jest większość szkodliwych produktów przemiany materii (poza gazami). Najważniejszymi produktami przemiany materii są: **dwutlenek węgla**, pochodzący z tlenowego rozpadu cukrów i tłuszczów, oraz **związki azotowe** (**mocznik**, **amoniak**, **kwas moczowy**, **kreatynina**), powstające jako produkt rozpadu białek. Transport produktów przemiany materii z miejsca ich wytworzenia (tkanki) do miejsca ich usuwania (narządy wydalnicze) zachodzi za pośrednictwem układu krwionośnego i krwi. Narządy wydalnicze mają bezpośrednią styczność ze światem zewnętrznym, a w zależności od charakteru wydalanych substancji można wśród nich wyróżnić cztery drogi usuwania szkodliwych metabolitów.

Budowa układu moczowego

Za pośrednictwem układu moczowego, stanowiącego najważniejszą strukturę wydalniczą organizmu, usuwane są nie tylko azotowe produkty przemiany materii dostarczane przez krew, lecz także spora ilość wody (dziennie ok. 1,5 l). Sam układ moczowy zbudowany jest z: parzystych nerek i moczowodów oraz nieparzystego pęcherza moczowego i cewki moczowej **(41.1.)**.

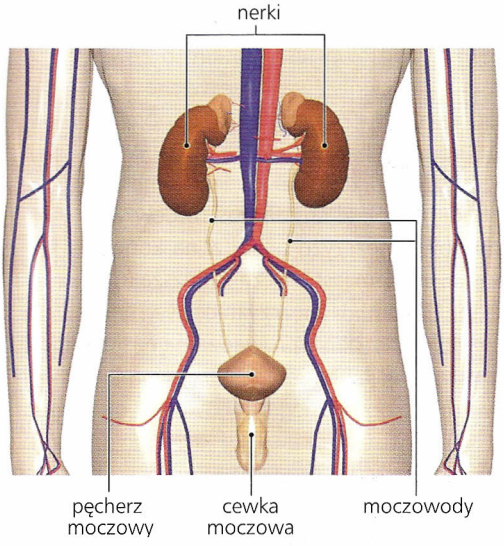


Budowa anatomiczna nerek

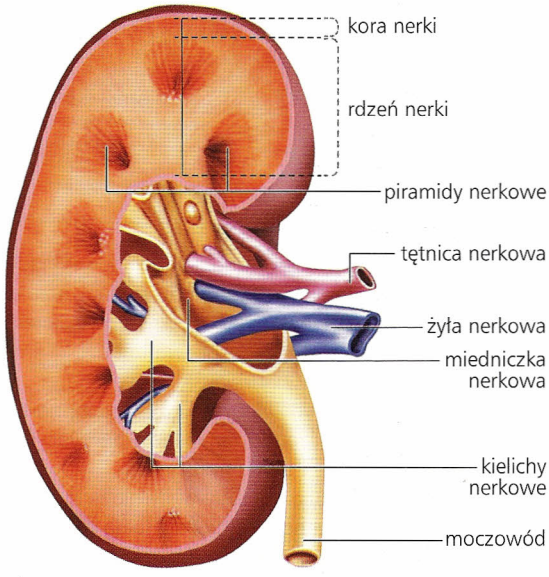
Parzyste nerki mieszczą się na tylnej ścianie jamy brzusznej. Obie znajdują się na wysokości kręgów lędźwiowych kręgosłupa, ale lewa nerka leży nieco wyżej. Kształtem przypominają nasiona fasoli, choć są znacznie większe. We wklęsłej części nerki do jej wnętrza wnikają tętnica nerkowa i nerwy oraz wychodzą z niej żyła nerkowa i moczowody.

Na przekroju nerki widać, że jej miąższ dzieli się na dwie warstwy – zewnętrzną, nazywaną korą nerki, oraz leżący wewnątrz rdzeń nerki **(41.2.)**. Część rdzeniowa układa się w charakterystyczne trójkątne struktury, określane jako **piramidy nerkowe**. Szczyty piramid nerkowych zbiegają się w środkowej części narządu, gdzie tworzą kielichy nerkowe. Uchodzą one do centralnie położonej części zwanej **miedniczką nerkową**.

Podstawą jednostką strukturalną i funkcjonalną nerki jest **nefron**, zbudowany z ciałka nerkowego oraz wychodzącego z niego układu kanalikowego. W skład każdej nerki wchodzi około miliona nefronów, których zadaniem jest filtrowanie krwi z obecnych w niej toksycznych produktów przemiany materii. Ze względu na złożoną budowę, ściśle powiązaną z pełnionymi funkcjami, nefrony szczegółowo omówiono w rozdziale poświęconym mechanizmom powstawania moczu.



41.1. Budowa układu moczowego



41.2. Struktura wewnętrzna nerki

? Dlaczego w trakcie wypadków nerki są szczególnie narażone na uszkodzenie?

Moczowody

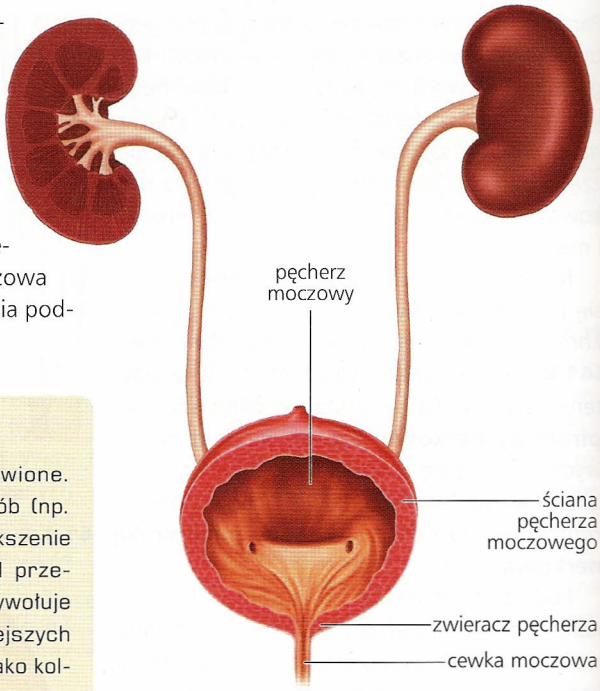
Mocz powstający w kanalikach nefronów przemieszcza się w kierunku miedniczki nerkowej, gdzie jest wstępnie gromadzony. Z miedniczki mocz spływa za pośrednictwem moczowodów (po jednym dla każdej nerki) w kierunku pęcherza moczowego. Moczowody to kanały długości około 30 centymetrów.

Pęcherz moczowy

Jest to elastyczny worek mięśniowy położony w jamie miednicznej i odgrywający rolę zbiornika moczu (o przeciętnej objętości wynoszącej ok. 700 ml) **(41.3.)**. W budowie mikroskopowej ściany pęcherza moczowego można wyróżnić podobne warstwy co w ścianach moczowodów (warstwę łącznotkankową, mięśniową oraz położoną wewnętrznie błonę śluzową). U podstawy pęcherza zlokalizowany jest okrężny mięsień nazywany zwieraczem pęcherza, który nie podlega woli i jest kontrolowany przez autonomiczny układ nerwowy. Możliwość świadomej kontroli oddawania moczu zapewnia leżący poniżej mięsień zwieracz cewki moczowej. Jest on sterowany przez układ somatyczny (zależny od woli).

Cewka moczowa

Cewka moczowa jest krótkim przewodem, mającym za zadanie wyprowadzenie moczu z pęcherza poza obręb organizmu. U kobiet cewka moczowa uchodzi do przedsionka pochwy i jest krótka (ma ok. 4 cm długości). Cewka moczowa mężczyzn uchodzi na końcu prącia, a zatem jest znacznie dłuższa (mierzy ok. 18 cm). U mężczyzn cewka moczowa służy również do wyprowadzania nasienia podczas kopulacji.



41.3. Budowa pęcherza moczowego

:: Ciekawostka

Moczowody są bardzo silnie unerwione. Zablokowanie ich w jakikolwiek sposób (np. przez kamień nerkowy) powoduje zwiększenie siły ruchów perystaltycznych ponad przeszkodą tamującą przepływ moczu. Wywołuje to niezwykle silny ból (jeden z najsilniejszych znanych medycynie) i jest określane jako kolka nerkowa.

PODSUMOWANIE

- Wydalanie szkodliwych substancji powstających w procesach przemiany materii jest niezbędne dla prawidłowego funkcjonowania organizmu.
- Z organizmu wydalane są głównie: dwutlenek węgla (przez płuca) oraz powstałe w wyniku rozpadu białek związki azotowe (mocznik, amoniak, kwas moczowy, kreatynina) – za pośrednictwem nerek.
- W procesach wydalniczych uczestniczą nerki, płuca, układ pokarmowy oraz skóra.
- Układ moczowy zbudowany jest z parzystych nerek i moczowodów oraz nieparzystego pęcherza moczowego i cewki moczowej.
- Nerki to parzyste narządy wydalnicze przypominające kształtem ziarna fasoli.
- Podstawową jednostką funkcjonalną nerki jest nefron.
- Z każdej nerki wychodzą moczowody prowadzące mocz w kierunku pęcherza.
- Pęcherz jest nieparzystym narządem przechowującym mocz wytworzony w nerkach.
- Gdy pęcherz zostanie wypełniony, jego zawartość jest wydalana na zewnątrz przez cewkę moczową.

ZADANIA

1. Scharakteryzuj narządy wydalnicze człowieka oraz substancje, jakie za ich pomocą są usuwane z organizmu.
2. Opisz budowę nerki jako głównego narządu wydalniczego.
3. Porównaj budowę męskiej i żeńskiej cewki moczowej.

W INTERNECIE

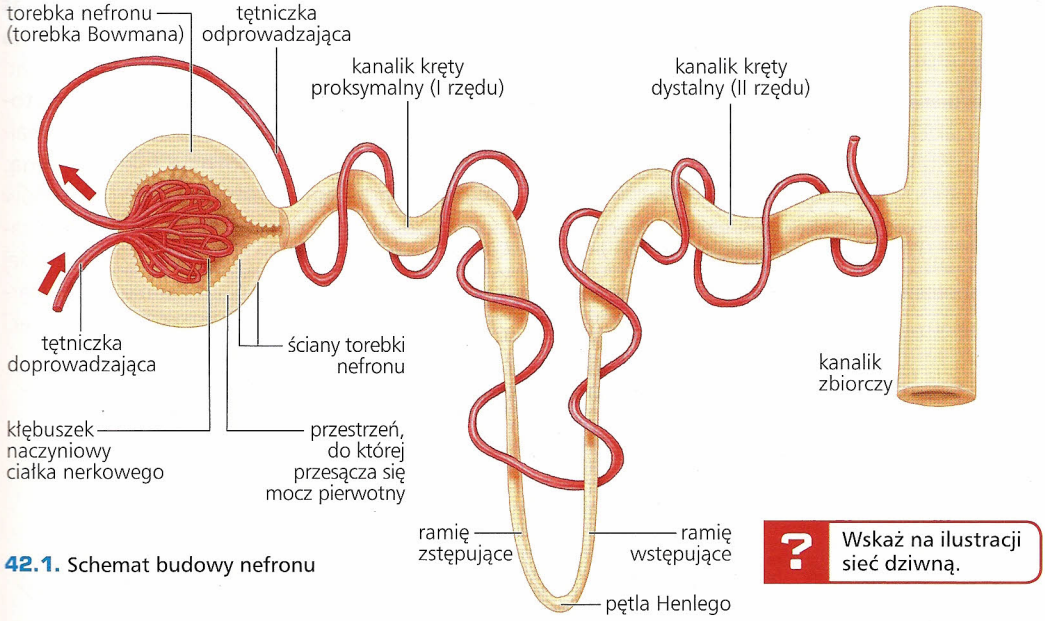
- http://www.nerki.info.pl/

42. Mechanizm powstawania moczu

Podstawowym zadaniem, jakie stoi przed **nerkami**, jest filtracja krwi ze szkodliwych produktów przemiany materii. Zaburzenie funkcji nerek i ich choroby stanowią zatem bardzo poważne zagrożenie dla organizmu. Prawidłowo funkcjonujące nerki nie tylko usuwają z ustroju zbędne substancje, lecz także regulują poziom wody, odpowiednio zwiększając lub zmniejszając objętość moczu.

Budowa nefronu

Jak wspomniano w poprzednim rozdziale, podstawową jednostką funkcjonalno-strukturalną nerki jest **nefron**, zbudowany z **ciałka nerkowego** oraz odchodzącego od niego układu **kanalików** (42.1.). Charakterystyczna pętla włosowatych naczyń krwionośnych tworzy tak zwany **kłębuszek nerkowy** (inaczej: kłębuszek Malpighiego). Krew jest do niego doprowadzana i z niego odprowadzana przez tętnicę (w typowych układach naczyniowych krew odprowadza żyła). Ta wyjątkowa struktura występuje jedynie w kłębuszku nerkowym i nosi nazwę sieci dziwnej. Kłębuszek nerkowy jest z zewnątrz otoczony przez **torebkę ciałka nerkowego**, nazywaną torebką Bowmana (pomiędzy jej podwójnymi ściankami znajduje się wolna przestrzeń). Kłębuszek nerkowy wraz z otaczającą go torebką ciałka nerkowego razem tworzą ciałko nerkowe. Tuż za torebką rozpoczyna się poskręcany **kanalik proksymalny** (tzw. kanalik kręty I rzędu). Za nim znajduje się **pętla nefronu** (zwana pętlą Henlego), zbudowana z ramienia zstępującego i wstępującego, które przechodzi w poskręcany **kanalik dystalny** (kanalik kręty II rzędu). Ostatnim odcinkiem układu kanalików w nefronie jest kanalik zbiorczy, wspólny dla kilku sąsiednich nefronów.



42.1. Schemat budowy nefronu

? Wskaż na ilustracji sieć dziwną.

Czynność nerek

Ze względu na swoją funkcję nerki są najbardziej unaczynionym narządem w ciele człowieka. W ciągu minuty przepływa przez nie blisko 25% całej krwi ustroju, a stanowią one jedynie około 0,5% masy organizmu. Pozwala to na szybkie i sprawne usunięcie z krwi wszystkich toksycznych metabolitów oraz utrzymanie stałego poziomu parametrów środowiska wewnętrznego ustroju (jak ciśnienie osmotyczne i wartość pH). W wyniku pracy nerek powstaje mocz, co wiąże się z trze-

ma ważnymi procesami fizjologicznymi: **filtracją** (przesączaniem kłębuszkowym), **resorpcją** oraz **sekrecją** (42.2.).

Przesączanie kłębuszkowe (filtracja pierwotna)

Krew dociera do naczyniowego splotu ciałka nerkowego za pośrednictwem tętniczki doprowadzającej, która rozgałęzia się na liczne naczynia włosowate. Ze względu na zmniejszenie średnicy naczyń dochodzi w nich do znacznego wzrostu ciśnienia krwi. Wysokie ciśnienie w połączeniu z cienkimi ścianami naczyń powoduje, że nawet jedna piąta osocza może się przesączyć do wnętrza torebki Bowmana. Ten przesącz (160–200 l na dobę) nazywa się **moczem pierwotnym**. Jego produkcja jest ułatwiona także dzięki temu, że w ścianach naczyń włosowatych kłębuszka nerkowego obecne są pory. Ich wielkość sprawia, że do moczu pierwotnego przenikają wszystkie związki chemiczne poza kwasami tłuszczowymi i białkami. Przez filtr kłębuszkowy nie przedostają się również elementy morfotyczne krwi (jak erytrocyty).

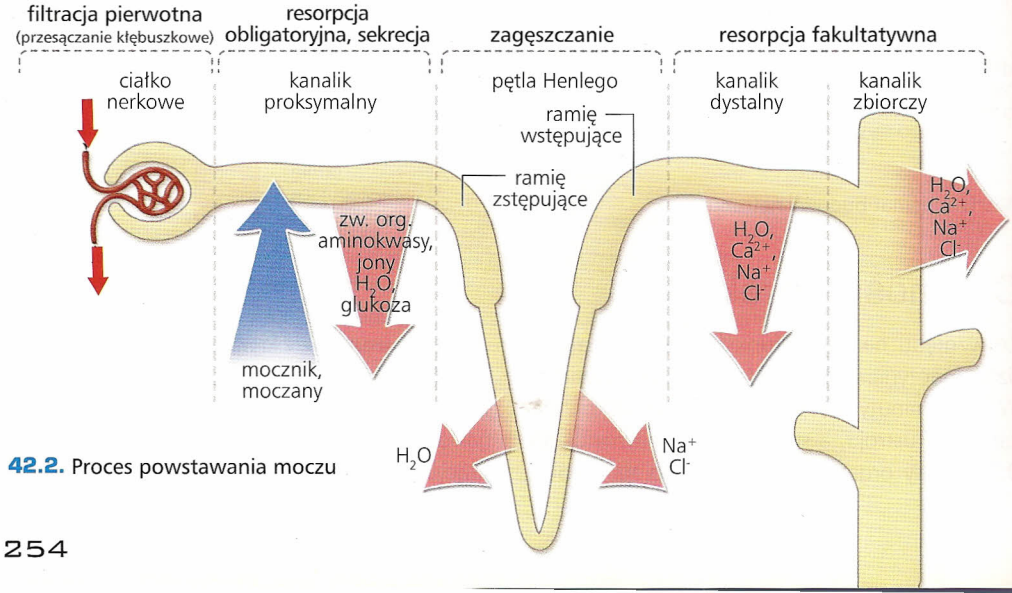
Resorpcja i sekrecja kanalikowa

Mocz pierwotny nie może zostać wydalony w ilości, w jakiej jest produkowany w ciągu doby, gdyż ponad stukrotnie przekracza ona objętość krwi w organizmie. Zostaje więc zagęszczony, co pozwala na oszczędność wody przy jednoczesnym skutecznym usuwaniu szkodliwych produktów metabolizmu. Mocz pierwotny jest również zagęszczany, aby zapobiegać utracie zawartych w nim substancji potrzebnych organizmowi (ponieważ składem przypomina osocze krwi, znajdują się w nim duże ilości takich związków, jak: glukoza, aminokwasy, jony sodowe i chlorkowe).

Zagęszczanie moczu pierwotnego zachodzi w układzie kanalikowym nefronu i obejmuje dwa procesy: **resorpcję** (czyli wchłanianie zwrotne) oraz **sekrecję** (czyli wydzielanie). Prowadzą one do powstania **moczu ostatecznego** (o objętości ok. 1,5 l).

Resorpcja

Resorpcja zachodząca w kanalikach nerkowych może być procesem biernym (czyli zgodnym z gradientem stężeń) lub czynnym (przeciwnym gradientowi, w trakcie którego zużywana jest energia). Do związków wchłanianych na drodze biernej należą **woda**, **jony sodu** i **chloru**, a na drodze czynnej – między innymi **glukoza**. Jest ona wchłaniana zwrotnie w każdej ilości, mimo iż jej stężenie w osoczu jest znacznie większe niż w moczu pierwotnym. Resorpcja glukozy z moczu ustaje dopiero wtedy, gdy jej stężenie w osoczu przekroczy wartość określaną jako **próg nerkowy dla glukozy** (10,1 milimoli na litr). Wówczas cukier pojawia się w moczu. Poza glukozą na drodze aktywnej wchłaniane są również m.in. aminokwasy. Wyróżniamy **resorpcję obligatoryjną**, zachodzącą stale w kanalikach proksymalnych nefronów, oraz **resorpcję fakultatywną**, zachodzącą w kanalikach dystalnych nefronów oraz w kanalikach zbiorczych. Ta ostatnia jest zależna od bieżących potrzeb. Zachodzi najczęściej w przypadku, gdy do organizmu nie jest dostarczana odpowiednia ilość płynów lub gdy traci



42.2. Proces powstawania moczu

on ich zbyt dużo (np. w wyniku intensywnego pocenia się). Mocz jest wówczas dodatkowo zagęszczany w wyniku zwiększenia przepuszczalności ścian kanalików dystalnych i kanalików zbiorczych. Odbywa się to pod wpływem wazopresyny wydzielanej przez tylny płat przysadki mózgowej.

Sekrecja

Przez komórki nabłonka tworzącego kanalik nerkowy przedostają się do jego wnętrza różne związki chemiczne. Proces ten, podobnie jak w przypadku resorpcji, może mieć postać wydzielania biernego lub aktywnego. Sekrecja może dotyczyć bardzo różnych związków, zarówno wytwarzanych przez organizm (np. kreatynina), jak i pochodzących z zewnątrz, w tym leków (np. kwas salicylowy, penicylina).

Wytwarzanie zagęszczonego (hipertonicznego) moczu

Zagęszczanie moczu jest efektem resorpcji wody i zachodzi najbardziej ekfektywnie w ramionach pętli Henlego. Mocz płynie w nich w przeciwne strony. W ramieniu zstępującym z moczu pierwotnego na drodze osmozy usuwana jest woda, co prowadzi do zagęszczenia przesączu kanalikowego. Woda ta nie zostaje ponownie wchłonięta w ramieniu wstępującym pętli Henlego, gdyż jest ono dla niej praktyczne nieprzepuszczalne. Ponadto komórki tworzące ramię wstępujące wydzielają aktywnie do przestrzeni okołokanalikowej jony sodu (Na^+). To powoduje zwiększenie stężenia płynu tkankowego otaczającego oba ramiona pętli Helnego i umożliwia opisaną osmozę wody z ramienia zstępującego. Aby ten system mógł działać nieprzerwanie, musi istnieć mechanizm odbierający wodę i jony Na^+ z przestrzeni okołokanalikowej. To zadanie naczyń krwionośnych, które oplatają pętle nefronów.

:: Ciekawostka

Spadek ciśnienia krwi obwodowej pociąga za sobą spadek ciśnienia w ciałku nerkowym. Gdy osiągnie ono poziom 40 mmHg, przesącz ustaje całkowicie, co prowadzi do groźnego w skutkach stanu zwanego bezmoczem lub anurią.

PODSUMOWANIE

- Podstawową jednostką strukturalną i funkcjonalną nerki jest nefron.
- Nefron składa się z ciałka nerkowego (zbudowanego z kłębuszka nerkowego otoczonego przez torebkę Bowmana) oraz systemu kanalików.
- System kanalików obejmuje: kanalik kręty I rzędu, pętlę Henlego, kanalik kręty II rzędu oraz kanalik zbiorczy (wspólny dla kilku nefronów).
- Funkcje nerek można opisać trzema procesami fizjologicznymi: filtracją (przesączaniem kłębuszkowym), resorpcją oraz sekrecją.
- W trakcie przesączania kłębuszkowego do wnętrza torebki Bowmana jest filtrowana w przybliżeniu jedna piąta osocza krwi.
- Całe przesączone osocze nosi nazwę moczu pierwotnego (powstaje go 160–200 l na dobę).
- Resorpcja zwrotna prowadzi do zagęszczenia moczu w wyniku zwrotnego wchłonięcia wody i potrzebnych organizmowi substancji (jak glukoza, aminokwasy, jony sodowe i chlorkowe).
- W trakcie sekrecji zostają do moczu wydzielone związki, które nie wydostały się do niego w drodze filtracji (np. leki).

ZADANIA

1. Opisz elementy budowy nefronu.
2. Porównaj skład moczu pierwotnego i ostatecznego.
3. Wyjaśnij różnicę między resorpcją a sekrecją.
4. Wyjaśnij rolę resorpcji zwrotnej.
5. Wymień hormon, który reguluje proces zwrotnego wchłaniania wody w kanalikach nerkowych.

BIBLIOGRAFIA

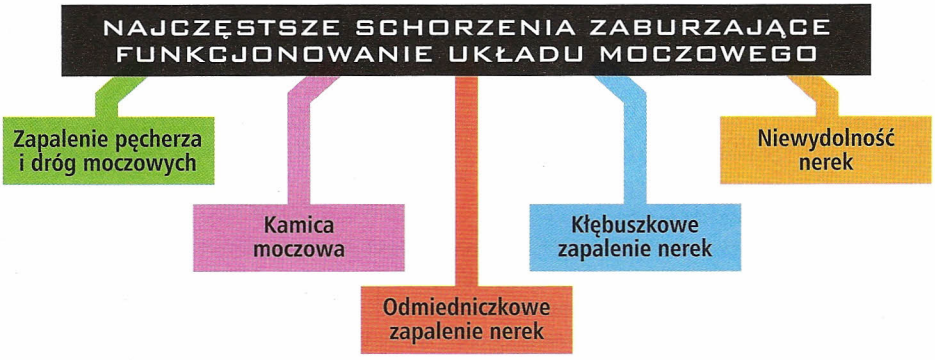
- William F. Ganong, *Fizjologia*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2007.

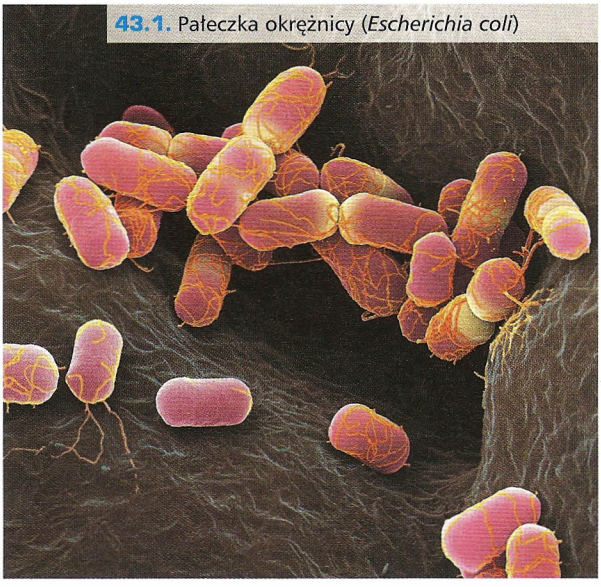
43. Choroby nerek

Przez **nerki** w ciągu minuty przepływa około 1,2 litra krwi, czyli mniej więcej 10% objętości przepompowywanej w tym czasie przez serce. Bez sprawnie funkcjonujących nerek nie byłoby możliwe ani oczyszczanie krwi i tkanek ze szkodliwych **produktów przemiany materii**, ani też utrzymanie prawidłowego stężenia **elektrolitów** i objętości **płynów ustrojowych**. Nerki są niesamowicie wydajnym narządem. Gdy jedna z nich zostanie usunięta (na skutek transplantacji lub procesu chorobowego), druga jest w stanie sama utrzymać parametry fizjologiczne organizmu na niezmienionym poziomie. Czasem jednak – wskutek działania rozmaitych czynników – dochodzi do **upośledzenia funkcji nerek**, które przekracza możliwości fizjologicznych mechanizmów kompensacyjnych. Stan taki stanowi olbrzymie zagrożenia dla zdrowia i życia organizmu.

Choroby dróg moczowych

Istnieje wiele czynników prowadzących do nieprawidłowości w procesie usuwania z organizmu szkodliwych produktów przemiany materii. Powodują one choroby układu wydalniczego, które dotyczą nie tylko nerek, lecz także narządów odprowadzających mocz.





43.1. Pałeczka okrężnicy (*Escherichia coli*)

Zapalenie pęcherza i dróg moczowych

Najczęstszą przyczyną stanu zapalnego dróg moczowych i pęcherza są infekcje powodowane przez różne bakterie **(43.1.)** **(43.2.)**. Zakażenie rozpoczyna się od cewki moczowej i przemieszcza w kierunku pęcherza, a następnie moczowodami dociera do miedniczek nerkowych. Do tego typu infekcji najczęściej dochodzi u kobiet, ponieważ ich cewka moczowa jest szeroka i krótka. Czynnikiem sprzyjającym rozwojowi zakażenia jest długotrwałe przetrzymywanie moczu w pęcherzu. W przypadku zapalenia pęcherza moczowego o ostrym przebiegu pojawia się uczucie parcia na pęcherz oraz pieczenie przy oddawaniu moczu.



43.2. Wyraźne strefy wzrostu kolonii (*Proteus mirabilis*) rozwijającej się na stałym podłożu hodowlanym (A); wykonane za pomocą SEM (skaningowy mikroskop elektronowy) zdjęcie *Proteus mirabilis*, na którym widać rzęski pokrywające komórkę bakterii (B).

Odmiedniczkowe zapalenie nerek

Do odmiedniczkowego zapalenia nerek dochodzi na skutek zakażenia bakteryjnego. Jest to jedno z najczęstszych schorzeń układu moczowego. Wyróżnia się dwie postaci odmiedniczkowego zapalenia nerek: ostrą oraz przewlekłą. Postać ostra cechuje się gwałtownym przebiegiem. Typowymi objawami są wysoka gorączka połączona z dreszczami oraz silny ból w okolicach lędźwiowych. Przedłużający się stan zapalny może doprowadzić do uszkodzenia nerek. Postawienie diagnozy jest możliwe na podstawie badania moczu. Bardziej niebezpieczna jest postać przewlekła, ponieważ powoduje powolne niszczenie kanalików nefronów. Problemem jest też brak objawów klinicznych, a skład moczu bardzo rzadko wykazuje nieprawidłowości. Trwające wiele lat upośledzenie czynności nerek skutkuje nadmierną utratą jonów (potasu, sodu, wapnia), a jednoczesne niewystarczające wydalanie związków azotowych może prowadzić do mocznicy.

Kłębuszkowe zapalenie nerek

Za kłębuszkowe zapalenie nerek w głównej mierze odpowiadają czynniki autoimmunizacyjne. Układ immunologiczny produkuje przeciwciała skierowane przeciwko specyficznym antygenom znajdującym się na powierzchni komórek budujących nefrony. Przypuszczalnie czynnikiem inicjującym reakcję autoagresywną są przedłużające się infekcje górnych dróg oddechowych. Charakterystycznym objawem kłębuszkowego zapalenia nerek są czerwone krwinki (krwiomocz) oraz białka (białkomocz) pojawiające się w moczu. Kłębuszkowe zapalenie nerek również występuje w dwóch postaciach: ostrej i przewlekłej. W postaci ostrej typowymi objawami są: osłabienie, brak apetytu, bóle głowy oraz nerek. Z kolei postać przewlekła nie powoduje praktycznie żadnych charakterystycznych objawów, ale prowadzi do trwałego uszkodzenia nerek i mocznicy.

:: Ciekawostka

Najwięcej i najcięższych infekcji układu moczowo-płciowego powoduje Gram-ujemna pałeczka odmieńca (*Proteus mirabilis*). Dzięki licznym, długim rzęskom jest ona zdolna do ruchu rozpełzliwego. Jego efektem są koncentryczne strefy wzrostu, które widać na powierzchni stałego podłoża hodowlanego kolonii tych drobnoustrojów. Ten sam mechanizm umożliwia bakterii porastanie wnętrza cewnika z prędkością kilku milimetrów na dobę w kierunku przeciwnym do strumienia wydalanego moczu. Jest to zjawisko szczególnie niebezpieczne dla pacjentów poddawanych zabiegowi cewnikowania.

Kamica moczowa

Kamica moczowa (nerkowa) polega na tworzeniu się kamienistych złogów w drogach moczowych **(43.3.)**. Najczęściej spotykanymi składnikami kamieni moczowych są trudno rozpuszczalne w wodzie sole: szczawian wapnia oraz fosforan wapnia. Za tworzenie się kamieni odpowiada dieta, która wpływa na rodzaj wydalanych produktów prze-

miany materii. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym kamicy jest długotrwały zastój moczu w kanałach wydalniczych. Prawdopodobieństwo wytrącenia się soli tworzących kamienie moczowe znacznie wzrasta u osób przyjmujących mało płynów. Jest tak, ponieważ osoby te w celu oszczędności wody produkują skąpe ilości bardzo zagęszczonego moczu, w którym granica rozpuszczalności różnych soli może być o wiele łatwiej osiągnięta.

Zanim dojdzie do wystąpienia objawów kamicy moczowej, choroba przez wiele lat rozwija się w sposób niezauważony. Drobne kamienie moczowe nie wpływają znacząco na przepływ moczu ani nie podrażniają wrażliwych nabłonków dróg moczowych. Duże kamienie mogą jednak przesunąć się w miednicze nerkowej, w rezultacie blokując przepływ moczu. Powoduje to bardzo silny ból, tak zwaną kolkę nerkową.



43.3. Sekcja nerki pacjenta z zaawansowaną kamicą nerkową widoczną w regionie miedniczki nerkowej

Niewydolność nerek

Niewydolność nerek to stan, w którym te narządy nie spełniają swoich podstawowych funkcji filtracyjnych i wydalniczych. Schorzenie to może przyjmować postać ostrą lub przewlekłą. W ostrej niewydolności nerek znacznemu ograniczeniu ulega produkcja moczu. Przyczyny mogą być bardzo różnorodne. Należą do nich: nagły spadek ciśnienia tętniczego krwi, niedrożność dróg wyprowadzających mocz, uszkodzenie nerek spowodowane stosowaniem leków lub posocznica.

Przewlekła niewydolność nerek jest schorzeniem trwającym dłużej, a pierwotne objawy są trudne do uchwycenia. Głównymi przyczynami choroby są: przewlekłe kłębuszkowe zapalenie nerek i przewlekłe odmiedniczkowe zapalenie nerek. Typowym objawem gromadzenia się w ustroju dużych ilości szkodliwych produktów przemiany materii jest **mocznica**. Może ona prowadzić do drżenia mięśni, a nawet śpiączki, po której następuje śmierć.

Czynniki sprzyjające rozwojowi kamicy nerkowej	Czynniki sprzyjające zapaleniu nerek
• infekcje bakteryjne z powikłaniami • przetrzymywanie moczu w drogach moczowych • fizjologiczne wydzielanie do moczu zwiększonych ilości wapnia, fosforanów oraz szczawianów	• bakteryjne zakażenia dróg moczowych (w odmiedniczkowym zapaleniu nerek oraz zapaleniu dróg moczowych) • nawracające i niedoleczone paciorkowcowe infekcje górnych dróg oddechowych (angina) (w kłębuszkowym zapaleniu nerek) • kamica nerkowa
Metody zapobiegania kamicy nerkowej	**Metody zapobiegania zapaleniu nerek**
• picie dużej ilości płynów (minimum 1,5 l dziennie) • unikanie przeziębienia nerek • unikanie spożywania dużej ilości potraw bogatych w kwas szczawiowy i preparatów wapnia	• dbanie o higienę układu moczowo-płciowego • picie dużej ilości płynów • wczesne wykrywanie i skuteczne leczenie schorzeń układu oddechowego

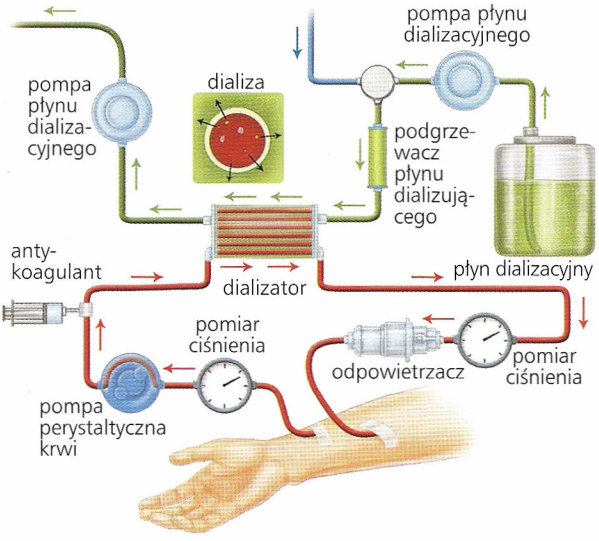
Dializa krwi

Osoby, których nerki przestały sprawnie funkcjonować i u których leczenie farmakologiczne jest nieskuteczne, muszą regularnie poddawać się **zabiegom dializacyjnym**. Pozwalają one na całkowite zastąpienie funkcji nerek zewnętrznym urządzeniem filtracyjno-resorpcyjnym, nazywanym **dializatorem** lub **sztuczną nerką** (43.4.). W trakcie trwania zabiegu krew pacjenta zostaje wypompowana poza organizm do urządzenia zawierającego liczne błony półprzepuszczalne (tzw. błony dializacyjne) tworzące kapilary. Te błony są zanurzone w płynie dializacyjnym, mającym skład zbliżony do osocza krwi, lecz zawierającym śladowe ilości produktów przemiany materii. Przepływ krwi pacjenta i płynu dializacyjnego odbywa się w przeciwnych kierunkach, co pozwala zachować

maksymalną różnicę stężeń szkodliwych substancji po obu stronach błony dializacyjnej.

Stosowana w dializatorach błona półprzepuszczalna umożliwia bezproblemowe przemieszczanie się najważniejszych szkodliwych produktów przemiany materii (jak mocznik, kreatynina i kwas moczowy). Przenikają one z krwi pacjenta, w której ich stężenie jest wyjściowo wysokie, w kierunku płynu dializacyjnego, gdzie ich praktycznie nie ma. W trakcie dializy krew zostaje również wzbogacona w glukozę oraz elektrolity, a po oczyszczeniu – wpompowana do krwioobiegu pacjenta.

Jeśli nerki są stale niewydolne, zabiegi dializacyjne muszą być prowadzone w regularnych odstępach czasu, niekiedy nawet codziennie. W wypadku ciężkiego uszkodzenia nerek pacjenci są dializowani do czasu znalezienia dawcy nerki i jej przeszczepu. Bywa, że dializy zostają doraźnie włączone do terapii stosowanej w chorobach nerek. Zabiegi dializacyjne odciążają je, co poprawia wyniki leczenia. W przypadku ciężkich zatruć dializa ma z kolei na celu usunięcie z ustroju określonej, szkodliwej substancji.



43.4. Schemat działania dializatora

? Dlaczego w przypadku ciężkiej niewydolności nerek dializy prowadzone są nawet codziennie?

Wyniki badania moczu

Nietypowe wyniki badania moczu mogą świadczyć o toczącym się procesie chorobowym, a analiza składu moczu umożliwia diagnozowanie nie tylko chorób nerek czy wątroby, lecz także żółtaczki lub cukrzycy.

Prawidłowe wyniki badania moczu

Parametr	Opis	Wartości prawidłowe
ciężar właściwy	Powinien być większy od ciężaru właściwego wody (wynoszącego 1,0 kg/l). Jeśli jest do niego zbliżony, świadczy to, że mocz nie jest zagęszczany, a to sugeruje niewydolność nerek.	1,015–1,025 g/ml
barwa	Ciemniejsza barwa świadczy o większym zagęszczeniu moczu, a jaśniejsza – o jego rozcieńczeniu.	słomkowożółta
przejrzystość	Jeśli mocz nie jest przejrzysty, może to świadczyć o infekcji dróg moczowych lub początkowej fazie kamicy nerkowej.	przejrzysty/klarowny
odczyn	Wpływ na pH moczu ma przede wszystkim dieta.	od 4,5 do 7,8
białko	Obecność białek w moczu świadczy o stanie zapalnym kłębuszków nerkowych.	poniżej 150 mg na dobę
glukoza	Obecność glukozy w moczu może świadczyć o cukrzycy, zatruciu lub fizycznym uszkodzeniu kanalików nerkowych.	0
ciała ketonowe	Ich obecność może świadczyć o zaawansowanej niewydolności nerek. Ciała ketonowe (aceton i kwas acetooctowy) mogą się też pojawić u osób z gorączką lub będących w stanie niedożywienia (np. na diecie).	0
bilirubina	Obecność bilirubiny w moczu pozwala zdiagnozować chorobę wątroby (np. żółtaczkę).	0

urobilinogen	Zwiększenie ilości urobilinogenu w moczu może świadczyć o zaburzeniach funkcji wątroby.	poniżej 1 mg na dobę
nabłonki	Są to komórki złuszczających się nabłonków nerek i przewodów moczowych. Ich obecność może świadczyć o zakażeniach dróg moczowych.	nieliczne w polu widzenia
krwinki białe	Obecność powyżej 10 leukocytów w polu widzenia może świadczyć o stanie zapalnym układu moczowego.	4–5 w polu widzenia
krwinki czerwone	Duża ilość krwinek czerwonych w polu widzenia może świadczyć o mechanicznym uszkodzeniu nerek lub przewodów moczowych.	3–4 w polu widzenia
wałeczki	Są to substancje tłuszczowe i białkowe zlepione w drogach moczowych. Podwyższona ilość może świadczyć o poważnym uszkodzeniu układu moczowego.	nieliczne

PODSUMOWANIE

- Najczęstszymi chorobami układu moczowego są: zapalenie pęcherza i dróg moczowych, zapalenie nerek (odmiedniczkowe i kłębuszkowe), kamica moczowa oraz niewydolność nerek.
- Stany zapalne pęcherza i dróg moczowych są wywoływane przez bakterie.
- Nieleczone stany zapalne pęcherza i dróg moczowych mogą doprowadzić do odmiedniczkowego zapalenia nerek.
- Przy kłębuszkowym zapaleniu nerek główną rolę odgrywają czynniki autoimmunizacyjne.
- Za tworzenie się kamieni moczowych odpowiadają dieta i zastoje moczu w drogach moczowych.
- Najczęściej spotykanymi składnikami kamieni moczowych są szczawian i fosforan wapnia.
- Najcięższym schorzeniem nerek jest niewydolność nerek.
- Dializa krwi to zabieg stosowany u pacjentów z niewydolnością nerek i polegający na zastąpieniu funkcji nerek zewnętrznym urządzeniem filtracyjno-resorpcyjnym (tzw. dializatorem lub sztuczną nerką).
- Krew przepływa przez dializator w naczyniach zbudowanych z błony półprzepuszczalnej i zanurzonych w płynie dializacyjnym.
- Stężenie szkodliwych metabolitów w płynie dializacyjnym jest niskie, a w krwi pacjenta – wysokie, dlatego przepływają one z krwi do płynu dializacyjnego.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego u kobiet częściej niż u mężczyzn dochodzi do rozwoju procesów zapalnych pęcherza moczowego i dróg moczowych.
2. Scharakteryzuj objawy mocznicy i wymień schorzenia nerek, w jakich może do niej dochodzić.
3. Omów zasadę działania dializatora.

BIBLIOGRAFIA

- Bartłomiejczyk I., Ciszek M., Cyganek A., *Choroby wewnętrzne*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2010.
- Grenda R., Jakubowska-Winecka A., *Przewlekłe choroby nerek*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2008.

W INTERNECIE

- http://nefrologia.mp.pl/choroby/chorobyudoroslych/show.html?id=51919/
- http://www.dialped.pl/archiwum/dializoterapia/choroby.html
- http://www.resmedica.pl/uklady-moczowy-i-plciowy/grozne-choroby-nerek

44. Budowa układu nerwowego

Układ nerwowy odgrywa nadrzędną rolę wobec pozostałych układów budujących organizm. Podstawowe elementy strukturalne tego układu to **mózg**, **rdzeń kręgowy** oraz **nerwy**. Umożliwiają one precyzyjną komunikację pomiędzy różnymi obszarami ciała, czasami znacznie oddalonymi. Pozwalają także na utrzymywanie łączności organizmu ze światem zewnętrznym, co jest niezbędnym warunkiem przetrwania. Dzięki układowi nerwowemu stało się możliwe wykształcenie świadomości i uczuć (np. strachu czy miłości) oraz umiejętności myślenia, mówienia, planowania (niezbędnych, aby zarówno zdobyć pożywienie, jak i uniknąć sytuacji zagrażających życiu).

Podział układu nerwowego

Układ nerwowy odpowiada za odbieranie bodźców ze świata zewnętrznego i integrację współpracy wszystkich narządów i układów, tworzy harmonijnie działający organizm. Kryteriami podziału układu nerwowego są jego budowa oraz czynności.

PODZIAŁ UKŁADU NERWOWEGO POD WZGLĘDEM BUDOWY

Ośrodkowy układ nerwowy

- Mózg i rdzeń przedłużony
- Rdzeń kręgowy

Obwodowy układ nerwowy

- Nerwy czaszkowe
- Nerwy rdzeniowe

PODZIAŁ UKŁADU NERWOWEGO POD WZGLĘDEM CZYNNOŚCI

Somatyczny układ nerwowy

Odbieranie bodźców ze świata zewnętrznego i reagowanie na nie, zarówno za pomocą czynności dowolnych, jak i odruchów bezwarunkowych.

Autonomiczny (wegetatywny) układ nerwowy

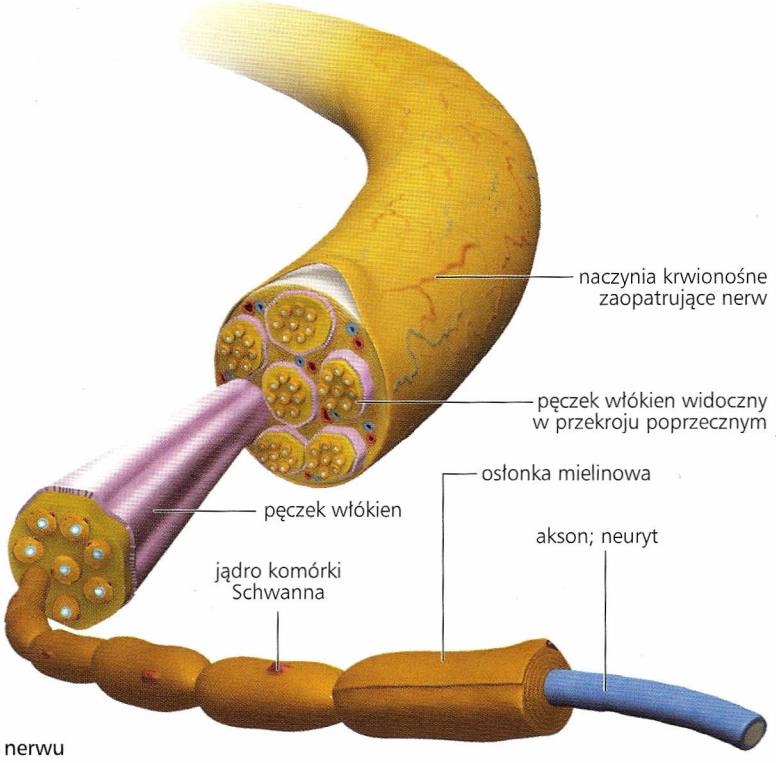
Regulowanie procesów przemiany materii i czynności narządów wewnętrznych.

- **Układ współczulny** – Mobilizacja organizmu w stanie stresu, walki i ucieczki oraz zwiększonego wysiłku fizycznego.
- **Układ przywspółczulny** – Odpoczynek organizmu, regeneracja zapasów energetycznych po intensywnym wysiłku fizycznym.

Budowa neuronu

Podstawowym elementem układu nerwowego jest komórka nerwowa, czyli **neuron** (jego budowę szczegółowo omówiono w pierwszej części podręcznika Grabowski S., Kurek A. *Biologia 1. Zakres rozszerzony*, OPERON, Gdynia 2012). Charakterystyczną cechą neuronu są wypustki plazmatyczne, umożliwiające kontakt sąsiednich komórek i przekazywanie impulsów nerwowych.

W ciele człowieka znajduje się około 100 miliardów neuronów, bardzo zróżnicowanych pod względem wielkości, kształtu, a także rodzaju wytwarzanych połączeń oraz wydzielanych neuroprzekaźników. Aksony neuronów obwodowego układu nerwowego łączą się w grubsze wiązki – tworzą **nerwy** (inaczej: **włókna nerwowe**) **(44.1.)**, docierające do wszystkich części ciała i narządów. W skład jednego włókna nerwowego mogą wchodzić zarówno aksony neuronów przekazujących informacje z receptorów (tzw. nerwy aferentne, czyli czuciowe), jak i docierających do odpowiednich efektorów (tzw. nerwy eferentne, czyli ruchowe).



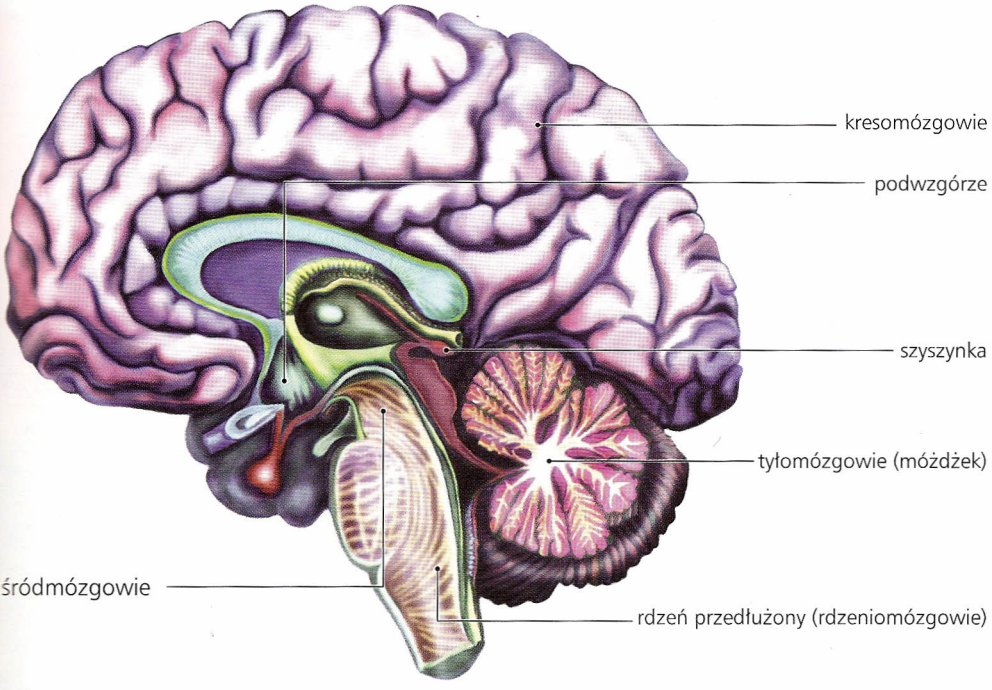
44.1. Budowa nerwu

Ośrodkowy układ nerwowy

Mózg

Mózg jest najważniejszą strukturą ośrodkowego układu nerwowego. Masa mózgu dorosłego człowieka waha się w granicach od 1200 do 1600 gramów (co stanowi ok. 1/48 masy całego organizmu). Jednak sprawność intelektualna nie zależy od masy samego mózgowia, ale w głównej mierze od struktury kory mózgowej.

Wyróżnia się pięć zasadniczych części **mózgowia**: kresomózgowie, międzymózgowie, śródmózgowie, tyłomózgowie oraz rdzeń przedłużony. Pod względem funkcjonalnym mózgowie dzieli się na trzy części: mózg (obejmujący kresomózgowie i międzymózgowie), pień mózgu (obejmujący śródmózgowie i rdzeń przedłużony) oraz móżdżek **(44.2.)**.



44.2. Budowa mózgu

Pień mózgu odpowiada za odziedziczone po przodkach proste odruchy kontrolujące najważniejsze funkcje ustroju. Uszkodzenie pnia (np. w wypadku) w praktyce oznacza śmierć, ponieważ po odłączeniu aparatury podtrzymującej życie organizm nie podejmuje akcji oddechowej i nie wznawia krążenia. Dlatego też zanik czynności tej części mózgowia często przyjmuje się za równoznaczny ze śmiercią całego organizmu.

Kresomózgowie

Jest to największa część mózgu, fizycznie pokrywająca pozostałe. W toku ewolucji przejęła ona kontrolę nad znaczną częścią czynności nadzorowanych wcześniej przez inne obszary mózgu (miało to kluczowe znaczenie w ewolucji człowieka).

Kresomózgowie zbudowane jest z dwóch półkul, oddzielonych biegnącą pomiędzy nimi szczeliną podłużną mózgu. Na jej dnie znajduje się obszar określany jako **spoidło wielkie** lub ciało modzelowate, zbudowane z istoty białej i odpowiadające za fizyczne spojenie obu półkul mózgu.

Każda z półkul składa się z leżącej głębiej istoty białej (zbudowanej z wypustek neuronów) oraz mieszczącej się na powierzchni istoty szarej (utworzonej przez ciała komórek nerwowych). Warstwa powierzchniowa to inaczej **kora mózgowa**. Jest ona silnie pofałdowana (po rozprostowaniu powstałby z niej kwadrat o boku 50 cm i grubości 2–4 mm). Składa się z uwypukleń przedzielonych bruzdami, które w każdej półkuli tworzą cztery płaty: **czołowy**, **ciemieniowy**, **skroniowy**, **potyliczny**.

:: Ciekawostka

W korze mózgowej mieści się około 20% (20 mld) wszystkich neuronów organizmu. Kora mózgowa zwykle składa się z sześciu warstw: drobinowej, ziarnistej zewnętrznej, piramidalnej zewnętrznej, ziarnistej wewnętrznej, piramidalnej wewnętrznej oraz warstwy zwojowej.

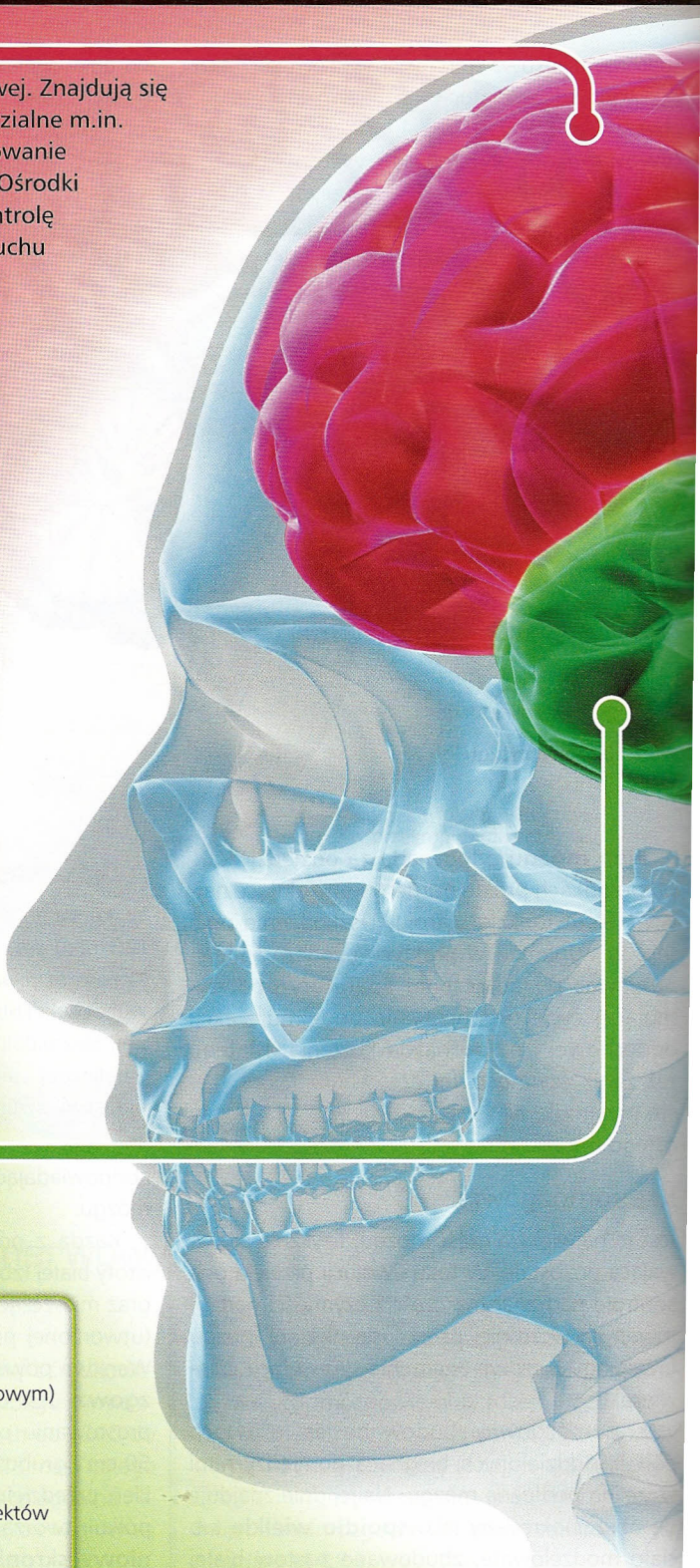
BUDOWA KRESOMÓZGOWIA

Płat czołowy

Zajmuje frontową część kory mózgowej. Znajdują się tutaj bardzo liczne ośrodki odpowiedzialne m.in. za świadomość, ocenę sytuacji, planowanie działania i ocenę jego konsekwencji. Ośrodki ruchowe pozwalają natomiast na kontrolę ruchów gałek ocznych oraz pamięć ruchu (przydatną np. podczas tańca).

Płat czołowy odpowiada za:
- ruchy dowolne
- ruchy mimowolne (wyuczone wzorce zachowań)
- ruchy gałek ocznych
- funkcjonowanie ośrodka ruchowego mowy
- kontrolę stanów emocjonalnych
- świadomość własnego bytu (kora przedczołowa)
- ocenę sytuacji i przewidywanie konsekwencji działań
- pamięć roboczą
- odczuwanie zapachów

Konsekwencje uszkodzeń:
- zaburzenia zdolności ruchu
- zaburzenia sekwencji ruchów
- upośledzenie zdolności planowania
- zaburzenia emocjonalne, agresja
- zaburzenia w zakresie rysowania i pisania

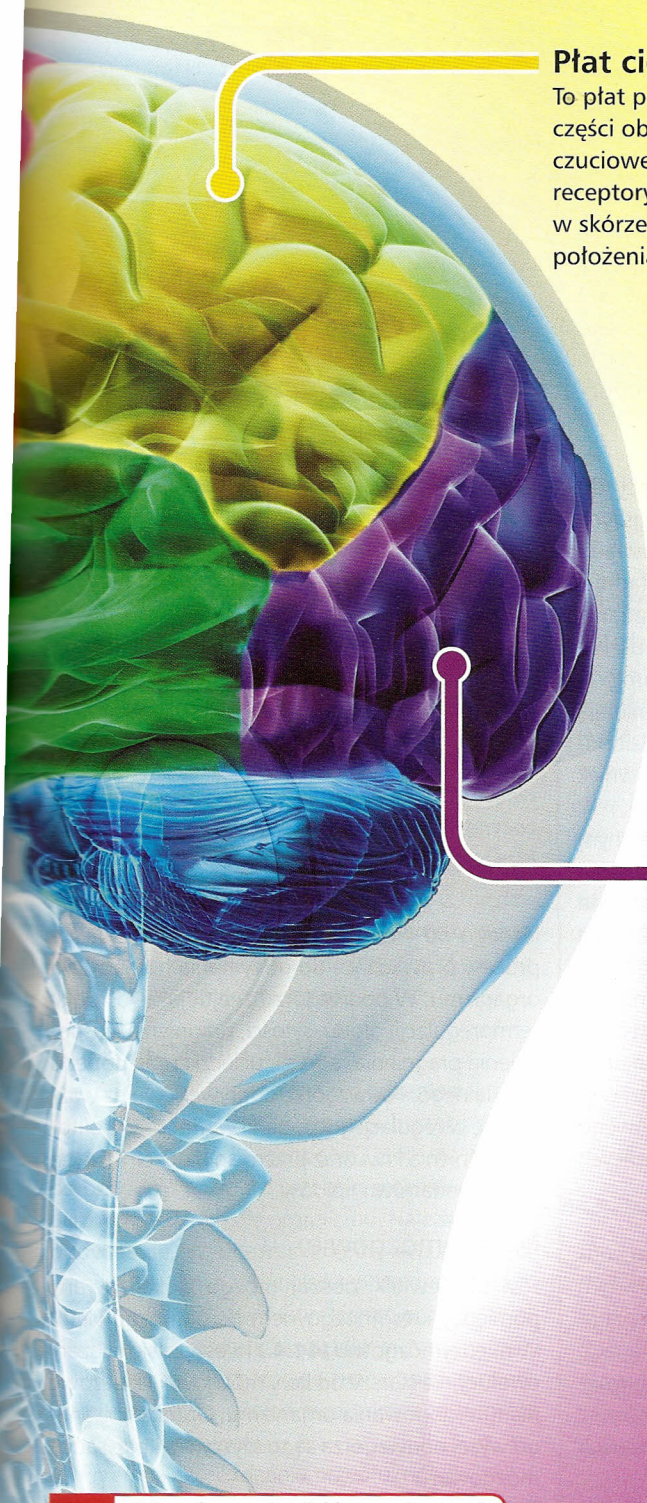


Płat skroniowy

Mieszczą się w nim ośrodki odpowiedzialne za analizę dźwięków (tzw. kora słuchowa).

Płat skroniowy odpowiada za:
- rozumienie mowy
- rozumienie reguł gramatycznych
- funkcje pamięciowe (razem z płatem czołowym)
- pamięć dźwiękową

Konsekwencje uszkodzeń:
- zaburzenie słuchu i rozumienia mowy
- problemy z rozpoznawaniem twarzy i obiektów
- problemy z przypominaniem faktów
- zaburzenia zachowań seksualnych



Płat ciemieniowy

To płat położony za płatem czołowym, na grzbietowej części obu półkul mózgu. Mieszczą się w nim ośrodki czuciowe odbierające impulsy przekazywane przez receptory temperatury, dotyku i nacisku zlokalizowane w skórze oraz receptory, informujące o zmianach położenia ciała.

Płat ciemieniowy odpowiada za:
- czucie skórne (temperatury, dotyku, bólu i nacisku)
- integrację bodźców napływających z różnych zmysłów

Konsekwencje uszkodzeń:
- zaburzenie orientacji przestrzennej
- zaburzenia rozpoznawania elementów otoczenia za pomocą zmysłów wzroku, słuchu oraz dotyku
- problemy z rozumieniem języka symbolicznego oraz tworzeniem pojęć abstrakcyjnych

Płat potyliczny

To obszar mózgu, w którym najważniejsze miejsce zajmują ośrodki czuciowe odpowiedzialne za odbieranie i analizowanie wrażeń wzrokowych. Pole wzrokowe obejmuje większą część tego płata, gdyż za pośrednictwem narządu wzroku dociera do mózgu około 80% bodźców.

Płat potyliczny odpowiada za:
- widzenie obiektów
- analizę kształtu, koloru i głębi (widzenie trójwymiarowe)
- obserwację ruchu obiektów

Konsekwencje uszkodzeń:
- zaburzenia widzenia obiektów
- ubytki w obszarach widzianego obrazu
- halucynacje wzrokowe
- trudności w rozpoznawaniu liter i znaków
- problemy z czytaniem
- problemy z analizą rysunku

? Które obszary twojej kory mózgowej zostały uruchomione w czasie czytania tekstu tego rozdziału?

Układ limbiczny

Układ limbiczny to obszar mózgu budowany przez struktury korowe i podkorowe. Odpowiada głównie za powstawanie złożonych stanów emocjonalnych (strach, zadowolenie, przyjemność) oraz za reakcje związane z popędami (np. popędem seksualnym). Jego funkcjonowanie ma kluczowe znaczenie dla procesu motywacji do działania. Najistotniejszymi z funkcjonalnego punktu widzenia elementami układu limbicznego są należące do kresomózgowia hipokamp i ciało migdałowate oraz będące częścią międzymózgowia podwzgórze **(44.3.)**.

Hipokamp

Ten niewielki parzysty narząd należący do kresomózgowia stanowi jeden z ważniejszych elementów układu limbicznego. Odpowiada głównie za funkcje pamięciowe, a dokładniej – za tworzenie śladów pamięciowych. Badania wykazały, że osoby, u których doszło do uszkodzenia hipokampu, mają problemy z pamięcią krótkotrwałą, a jednocześnie dobrze pamiętają wydarzenia dawniejsze (np. z wczesnego dzieciństwa). Obserwowane zaburzenia dotyczą również tworzenia pojęć abstrakcyjnych.

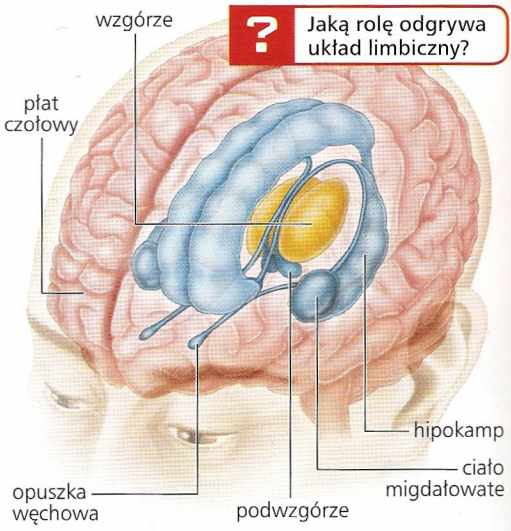
Istnieją podejrzenia, że hipokamp jest jedynym obszarem mózgu, w którym całe życie zachodzą podziały komórek nerwowych, co pozwala na ciągłe uczenie się. Udowodniono również, że w warunkach długotrwałego stresu może dojść do uszkodzenia hipokampu. Jest to wynikiem szkodliwego działania dużych dawek kortyzolu (hormonu stresu), które hamują podziały neuronów hipokampu. Do sytuacji takiej dochodzi często w wyniku tak zwanego stresu pourazowego (np. doświadczanego przez żołnierzy biorących udział w działaniach wojennych).

Ciało migdałowate

To niewielka parzysta struktura mózgu, odpowiadająca za pamięć emocjonalną. Głównym zadaniem ciała migdałowatego jest rozpoznanie stresora i przypisanie do niego określonego znaczenia emocjonalnego, zwykle negatywnego. Dzięki ciału migdałowatemu w hipokampie dochodzi do tworzenia śladów pamięciowych sytuacji, którym towarzyszą silne emocje.

Podwzgórze

Ten obszar mózgu jest nadrzędnym elementem autonomicznego układu nerwowego (niezależnego od woli). Odpowiada za najważniejsze procesy prowadzące do utrzymania homeostazy organizmu. W podwzgórzu znajdują się ośrodki: termoregulacji, głodu, sytości, pragnienia, zaspokojenia pragnienia, agresji, ucieczki oraz popędu seksualnego. Podwzgórze odgrywa również ważną rolę w regulacji gospodarki wodno-elektrolitowej, ciśnienia krwi oraz przemian biochemicznych węglowodanów i lipidów.



? Jaką rolę odgrywa układ limbiczny?

44.3. Schemat budowy układu limbicznego człowieka

:: Ciekawostka

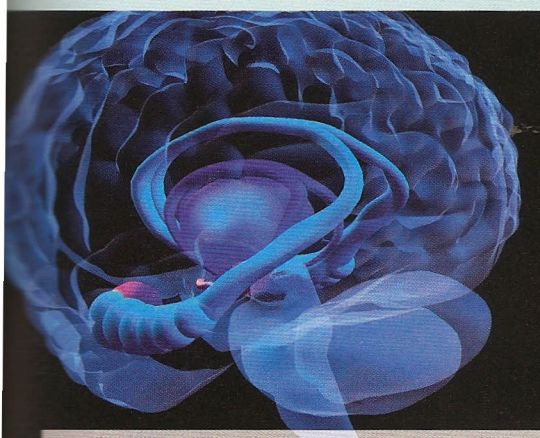
Podwzgórze oprócz funkcji regulacyjnych pełni również funkcje gruczołu wydzielania wewnętrznego. Produkuje wazopresynę i oksytocynę, które fizycznie wydzielane są przez leżącą poniżej przysadkę mózgową.

Międzymózgowie

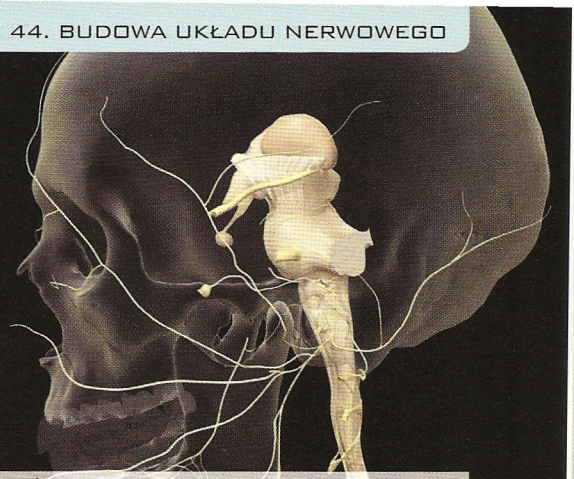
Jest to niewielki obszar mózgu zlokalizowany pomiędzy kresomózgowiem i śródmózgowiem. W międzymózgowiu **(44.4.)** mieszczą się obszary ewolucyjnie starsze od kory mózgowej i kluczowe dla funkcjonowania organizmu. Oprócz opisanego wyżej podwzgórza są to szyszynka i przysadka mózgowa.

Szyszynka

To niewielki obszar mózgu stanowiący ważny gruczoł dokrewny. Komórki szyszynki produkują me-



44.4. Międzymózgowie



44.5. Śródmózgowie

latoninę – hormon odpowiedzialny za regulację faz snu i czuwania (jej funkcje szerzej omówiono w rozdziale 54. poświęconym układowi hormonalnemu).

Przysadka mózgowa

Jest niedużym gruczołem dokrewnym, funkcjonalnie połączonym z podwzgórzem. Wydziela liczne hormony (m.in.: hormon wzrostu, prolaktynę, LH, FSH, oksytocynę i wazopresynę). Szerzej omówiono je w rozdziale poświęconym układowi dokrewnemu.

Śródmózgowie

Śródmózgowie **(44.5.)** jest częścią pnia mózgu łączącą móżdżek i rdzeń przedłużony z międzymózgowiem. Znajdują się tutaj ośrodki odpowiedzialne za niektóre odruchy wzrokowe (np. odruch źreniczny) i słuchowe.

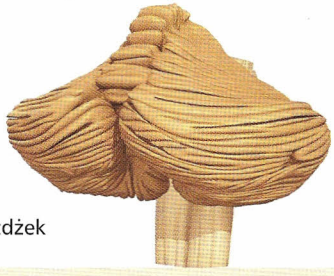
Rdzeń przedłużony

Jest połączony bezpośrednio z rdzeniem kręgowym i zawiera liczne skupiska substancji szarej. Tworzy ona ośrodki nerwowe, które na drodze odruchowej kontrolują przebieg procesów fizjologicznych ważnych dla organizmu. Należą do nich: oddychanie, szybkość skurczów serca, odruch ssania, połykanie, wydzielanie potu oraz odruchy obronne (kaszel, wymioty, kichanie, mruganie). Wiele z tych ośrodków działa automatycznie, a niektóre są uruchamiane przez bodźce napływające z odpowiednich receptorów za pomocą nerwów czuciowych.

Przednia część rdzenia przedłużonego, zlokalizowana tuż za śródmózgowiem, określana jest jako **most**. Jest on miejscem przewodzenia impulsów nerwowych z kory mózgowej do móżdżku, rdzenia przedłużonego i dalej do rdzenia kręgowego. W przeciwnym kierunku przewodzi bodźce czuciowe.

Móżdżek

Móżdżek **(44.6.)**, podobnie jak kresomózgowie, składa się z dwóch półkul o silnie pofałdowanej powierzchni. Są one połączone tak zwanym robakiem. Najważniejszym zadaniem móżdżku jest odbieranie informacji napływających z receptorów ciała i kontrolowanie ruchów ciała. W razie uszkodzenia móżdżku mogą wystąpić takie zaburzenia, jak: utrata napięcia mięśniowego, utrata koordynacji ruchów (na skutek zaburzonego odczuwania odległości), drżenie kończyn, męczliwość mięśni.



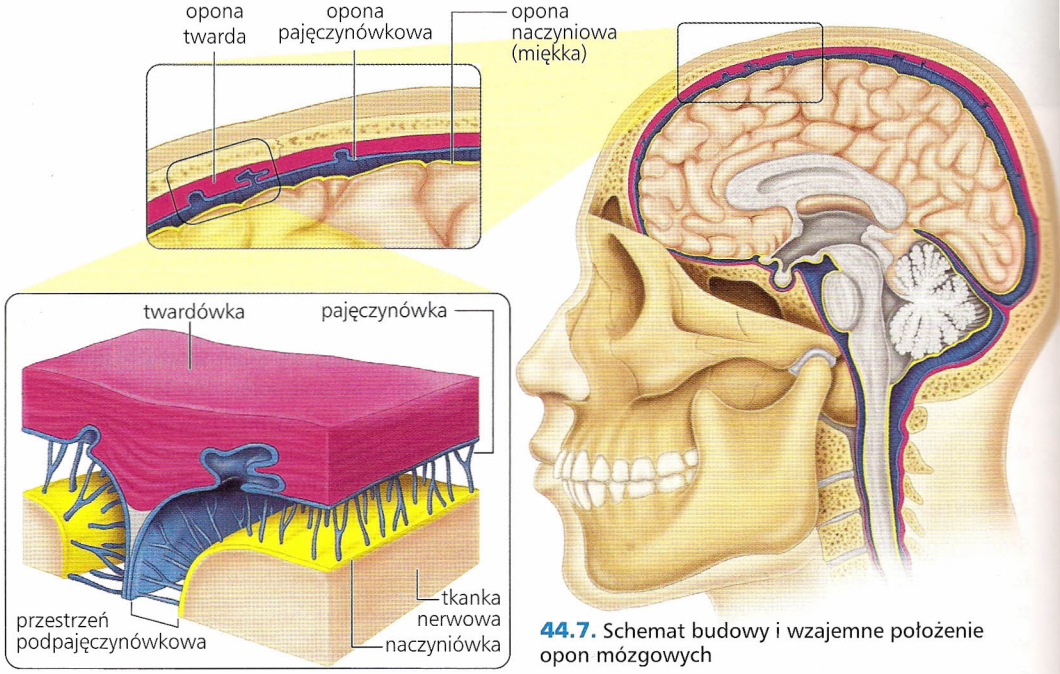
44.6. Móżdżek

:: Ciekawostka

Upojenie alkoholowe powoduje czasowe zaburzenie funkcji móżdżku, a ciężkie zatrucie alkoholem może prowadzić do jego trwałego uszkodzenia i utraty koordynacji ruchów. Popularne określenie „zalać robaka" wywodzi się z terminologii medycznej i oznacza zaburzenie funkcji tej części móżdżku pod wpływem wysokich dawek alkoholu.

Opony mózgowo-rdzeniowe

Mózg oraz rdzeń kręgowy są otoczone przez trzy błony zbudowane z tkanki łącznej (czyli **opony mózgowo-rdzeniowe**) **(44.7.)**. Na zewnątrz znajduje się opona twarda, pod nią leży opona pajęcza (tzw. pajęczynówka), a najbardziej wewnętrzne położenie zajmuje naczyniówka (inaczej opona miękka). Głównym zadaniem opon mózgowych jest ochrona leżących poniżej ośrodków nerwowych przed urazami mechanicznymi. Dodatkowe funkcje amortyzacyjne pełni płyn mózgowo-rdzeniowy, wypełniający przestrzeń podpajęczynówkową (między oponą pajęczą a oponą miękką). Jest on również obecny w układzie komorowym mózgu i kanale centralnym rdzenia kręgowego, gdzie odgrywa podobną rolę.



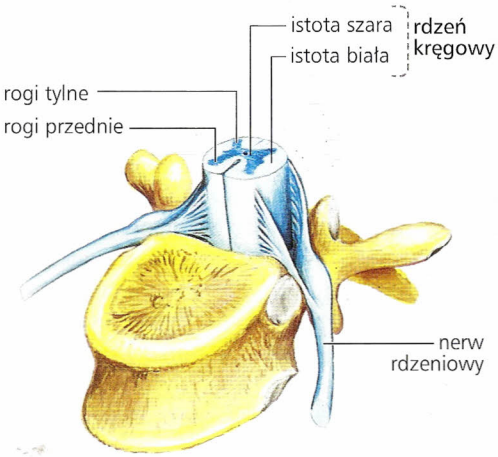
44.7. Schemat budowy i wzajemne położenie opon mózgowych

Rdzeń kręgowy

Pod względem budowy rdzeń kręgowy przypomina spłaszczony gruby sznur (o przeciętnej średnicy ok. 1 cm). Rozpoczyna się od granicy rdzenia przedłużonego i biegnie w kanale kręgowym aż po odcinek lędźwiowy kręgosłupa **(44.8.)**.

Podobnie jak mózg, rdzeń również jest otoczony trzema oponami. Na przekroju poprzecznym rdzenia kręgowego wyraźnie widać dwie strefy: położoną powierzchniowo substancję białą oraz zlokalizowaną w środku i otaczającą kanał środkowy substancję szarą **(44.9.)**. Substancja szara tworzy kształt przypominający literę H, w której można wyróżnić rogi brzuszne oraz rogi grzbietowe.

Rdzeń kręgowy pełni dwie zasadnicze funkcje. Przede wszystkim działa jako dwukierunkowy szlak komunikacyjny między mózgiem a najdal-



44.8. Ułożenie rdzenia kręgowego w kanale kręgowym

szymi obszarami ciała. Po drugie, steruje prostymi reakcjami odruchowymi (jak cofnięcie ręki po dotknięciu gorącego przedmiotu). Zachodzą one o wiele szybciej, niż gdyby zaangażowana została w nie kora mózgowa, i zwykle pozwalają na skuteczne uniknięcie zagrożenia, a tym samym – na przetrwanie w środowisku.

Obwodowy układ nerwowy

Elementami obwodowego układu nerwowego są nerwy oraz ich zwoje. Wyróżnia się wśród nich parzyste nerwy wychodzące z mózgowia (tzw. nerwy czaszkowe) oraz parzyste nerwy rdzeniowe, wychodzące z rdzenia kręgowego **(44.10.)**. Zarówno nerwy czaszkowe, jak i rdzeniowe zawierają dendryty i neuryty komórek nerwowych, dzięki czemu odpowiadają za połączenie wszystkich receptorów i efektorów z ośrodkowym układem nerwowym.

Nerwy czaszkowe

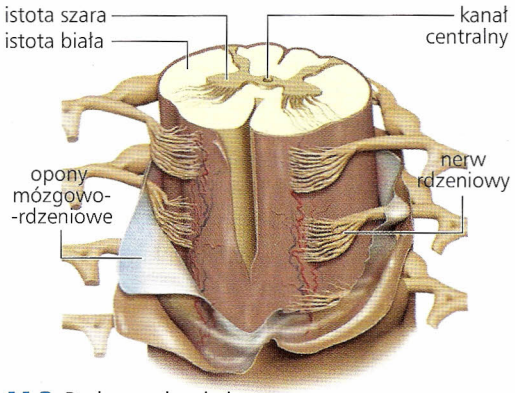
Odpowiadają głównie za unerwianie okolic głowy i szyi. U człowieka (i innych owodniowców) jest ich dwanaście par. Część z tych nerwów przewodzi impulsy z receptorów (np. nerwy węchowe, wzrokowe) – są to nerwy czuciowe. Inne odpowiadają za ruch np. gałki ocznej – są to nerwy ruchowe. Jeszcze inne pełnią obie funkcje – są to nerwy mieszane (np. nerw błędny).

Nerwy rdzeniowe

Jest to 31 par nerwów. Każdy nerw z pary składa się z dwóch **korzeni** (nazywanych analogicznie do rogów istoty szarej w rdzeniu kręgowym): **brzusznego**, wyposażonego we włókna ruchowe prowadzące do efektorów (zwykle mięśni lub gruczołów), oraz **grzbietowego** – zbudowanego z włókien czuciowych odbierających impulsy z receptorów. Wszystkie nerwy rdzeniowe (powstałe z połączenia obu korzeni) mają zatem zarówno włókna ruchowe, jak i czuciowe. Zatem zaliczają się do nerwów mieszanych. Nerwy rdzeniowe wychodzą z kręgosłupa otworami międzykręgowymi i docierają bezpośrednio do odpowiednich efektorów lub receptorów zlokalizowanych w narządach, mięśniach lub skórze.

Autonomiczny układ nerwowy

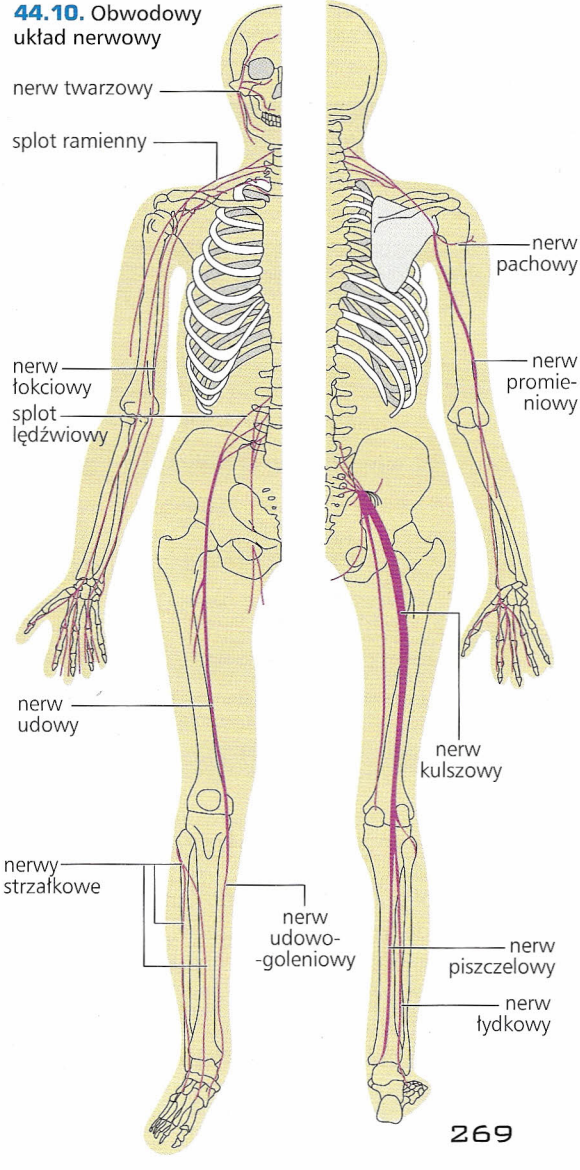
Autonomiczny układ nerwowy (nazywany też wegetatywnym) nie podlega kontroli świadomości



44.9. Budowa rdzenia kręgowego

? Porównaj wzajemne położenie istoty białej i szarej w rdzeniu kręgowym i kresomózgowiu.

44.10. Obwodowy układ nerwowy



(stąd jego nazwa). Co więcej, efekty działania tego układu albo wcale nie są uświadamiane, albo dzieje się to rzadko (np. nie można świadomie przyspieszyć perystaltyki jelita cienkiego ani nie jest ona odczuwana). Układ autonomiczny jest sterowany przede wszystkim przez podwzgórze. Otrzymuje ono precyzyjne informacje o zaburzeniach homeostazy organizmu i reaguje w taki sposób, aby ją przywrócić.

Układ autonomiczny (podobnie jak somatyczny) zbudowany jest ze zwojów oraz nerwów czuciowych i ruchowych. Pod względem funkcjonalnym składa się z dwóch części, działających antagonistycznie: **współczulnej** (**sympatycznej**) i **przywspółczulnej** (**parasympatycznej**). Większość efektorów znajdujących się w kontrolowanych przez układ autonomiczny narządach ma podwójne unerwienie. Oznacza to, że docierają do nich drogi nerwowe zarówno części współczulnej, jak i przywspółczulnej, dlatego działają one względem siebie przeciwstawnie – pobudzająco lub hamująco.

Rola współczulnej części układu autonomicznego

Pobudzenie części współczulnej autonomicznego układu nerwowego następuje w warunkach silnego stresu, ma więc na celu krótkotrwałą, ale zdecydowaną mobilizację organizmu w stanie zagrożenia. Neurony tej części układu nerwowego w większości przypadków w swoich zakończeniach synaptycznych wydzielają noradrenalinę, a trwające krótko pojedyncze pobudzenie obejmuje znaczne obszary ustroju.

Działanie współczulnego i przywspółczulnego układu autonomicznego

część współczulna	Narząd	część przywspółczulna
rozszerza	**źrenica**	zwęża
skurcz mięśni przywłosowych (tzw. „gęsia skórka")	**skóra**	rozkurcz mięśni przywłosowych
wydzielanie potu: ogólne oraz miejscowe (np. na dłoniach)	**gruczoły potowe**	ogólne wydzielanie potu
rozszerza	**oskrzela**	zwęża
przyspiesza akcję serca	**serce**	zwalnia akcję serca
rozkurcza mięśnie pęcherza	**pęcherz moczowy**	kurczy mięśnie pęcherza
hamuje wydzielanie śliny (jest jej mało i staje się gęsta)	**gruczoły ślinowe**	pobudza wydzielanie wodnistej śliny
zmniejsza motorykę	**żołądek**	wzmaga motorykę
zmniejsza perystaltykę, hamuje wydzielanie soku jelitowego	**jelita**	wzmaga perystaltykę, pobudza wydzielanie soku jelitowego
zmniejsza wydzielanie insuliny	**trzustka**	wzmaga wydzielanie insuliny
rozkurcza ściany pęcherzyka (zmniejsza wydzielanie żółci)	**pęcherzyk żółciowy**	kurczy ściany pęcherzyka (wzmaga wydzielanie żółci)
zmniejsza aktywność wydzielniczą	**gruczoły trawienne**	zwiększa aktywność wydzielniczą

Rola przywspółczulnej części układu autonomicznego

Przywspółczulna część układu autonomicznego odpowiada głównie za wyciszenie, regenerację sił organizmu oraz procesy trawienne. Bardzo ważnym elementem części przywspółczulnej jest należący do nerwów czaszkowych nerw błędny (dochodzący do płuc, serca, żołądka, jelit, wątroby itp.). W przeciwieństwie do układu współczulnego układ przywspółczulny nie reaguje w sposób całościowy (co jest konieczne podczas mobilizacji organizmu), lecz uruchamia jedynie te funkcje, które są w danym momencie potrzebne. Neurotransmiterem układu przywspółczulnego jest wyłącznie acetylocholina.

:: Ciekawostka

Z pokrzyku wilczej jagody (*Atropa belladonna*) otrzymuje się atropinę, która blokuje receptor muskarynowy. Zwykle wiąże on acetylocholinę, będącą neuroprzekaźnikiem w układzie przywspółczulnym. W związku z blokadą receptora przewagę uzyskuje układ współczulny (w którym głównym neuroprzekaźnikiem jest noradrenalina). Znajduje to zastosowanie w okulistyce. Aby dokładnie obejrzeć wnętrze gałki ocznej, lekarz zakrapla do worka spojówkowego roztwór atropiny, co powoduje rozszerzenie źrenicy, mimo że do oka dociera duża ilość światła.

PODSUMOWANIE



- Najważniejszymi elementami układu nerwowego są mózg, rdzeń kręgowy oraz nerwy.
- Podstawową jednostką funkcjonalną układu nerwowego jest neuron.
- Układ nerwowy pod względem budowy dzieli się na ośrodkowy i obwodowy, a pod względem czynności – na somatyczny i autonomiczny (składający się z części współczulnej i przywspółczulnej).
- Mózg jest najważniejszą strukturą ośrodkowego układu nerwowego. Składa się z przodomózgowia (kresomózgowia), międzymózgowia, śródmózgowia, rdzenia przedłużonego i móżdżku.
- Kresomózgowie jest największą częścią mózgu, fizycznie pokrywającą pozostałe.
- Układ limbiczny odpowiada za emocje oraz zapamiętywanie. Składa się z podwzgórza, hipokampu oraz ciała migdałowatego.
- Międzymózgowie składa się z podwzgórza, szyszynki oraz przysadki mózgowej.
- W śródmózgowiu zlokalizowane są ośrodki odruchów wzrokowych i słuchowych.
- Rdzeń przedłużony obejmuje ośrodki nerwowe sterujące ważnymi dla organizmu procesami fizjologicznymi, jak: oddychanie, szybkość skurczów serca, odruch ssania, połykanie, wydzielanie potu oraz odruchy obronne (kaszel, wymioty, kichanie, mruganie).
- Móżdżek odbiera informacje napływające z wszystkich receptorów i kontroluje ruchy ciała.
- Mózg oraz rdzeń kręgowy są otoczone przez trzy łącznotkankowe opony (twardą, pajęczynówkę oraz oponę miękką). Pełnią one funkcje ochronne.
- Oprócz ośrodkowego układu nerwowego do komunikacji ze światem służy obwodowy układ nerwowy, w skład którego wchodzą nerwy czaszkowe (12 par) oraz nerwy rdzeniowe (31 par).
- Autonomiczny układ nerwowy reguluje procesy niezależne od woli i składa się z części współczulnej i przywspółczulnej.
- W części współczulnej neuroprzekaźnikiem jest głównie noradrenalina, wydzielana w warunkach silnego stresu i mobilizująca organizm do działania w razie zagrożenia.
- W części przywspółczulnej neuroprzekaźnikiem jest acetylocholina, a jej zadania to wyciszenie i regeneracja organizmu, a także regulacja procesów trawiennych.

ZADANIA



1. Omów funkcje hipokampu.
2. Wymień dwa zaburzenia będące objawami uszkodzenia móżdżku.
3. Wymień rodzaje opon mózgowo-rdzeniowych i omów ich funkcje.
4. Wyjaśnij rolę układów współczulnego i przywspółczulnego w regulacji środowiska wewnętrznego organizmu.

BIBLIOGRAFIA



- Skawina A., *Anatomia prawidłowa człowieka – ośrodkowy układ nerwowy*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2006.
- Krause M., *Człowiek i jego układ nerwowy*, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 2003.

W INTERNECIE



- http://stres-info.com.pl/

45. Proces powstawania impulsu nerwowego

Zdolność do wzbudzenia i przemieszczenia **impulsu nerwowego** jest jedną z charakterystycznych cech komórek nerwowych. Impuls nerwowy powstaje na skutek podrażnienia i ma charakter zaburzenia elektrycznego, które przemieszcza się na powierzchni błony neuronu, między jego częścią pobudzoną a niepobudzoną.

Mechanizm powstawania impulsu nerwowego

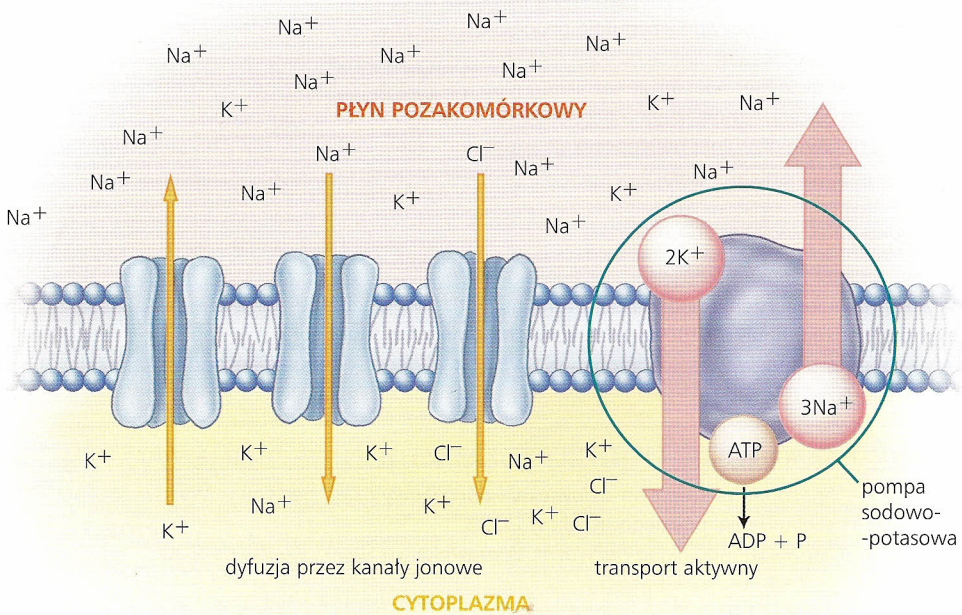
Najważniejszą rolę w przewodzeniu impulsu nerwowego odgrywa błona plazmatyczna (tzw. neurolemma) otaczająca neuron. Charakterystyczną cechą komórek nerwowych jest ich elektryczna polaryzacja, będąca wynikiem zgromadzenia się nadmiaru ładunków ujemnych po wewnętrznej stronie neurolemmy, a ładunków dodatnich – po stronie zewnętrznej **(45.1.)**.

Potencjał spoczynkowy

Różnica potencjałów (określana jako **potencjał spoczynkowy**) występująca w niepobudzonej komórce nerwowej wynosi około –70 mV (miliwoltów).

Istnienie różnicy potencjałów jest możliwe dzięki selektywnej przepuszczalności neurolemmy względem jonów. Oznacza to, że jony potasu (K^+) i chloru (Cl^-) mogą się przez nią swobodnie przemieszczać, a jony sodu (Na^+) są przez nią zatrzymywane. Gdy neuron znajduje się w stanie spoczynku, różnica potencjałów jest utrzymywana w stanie równowagi dynamicznej. Dzieje się to dzięki zespołowi białek obecnych w błonie neuronu i nazywanych **pompą sodowo-potasową**. Wykorzystując energię z ATP, wypompowuje ona z komórki nerwowej jony sodu i transportuje do jej wnętrza jony potasu (na każde dostarczone dwa jony K^+ usuwane są trzy jony Na^+). Ponieważ

45.1. Schemat polaryzacji błony komórkowej aksonu



? Wyjaśnij rolę pompy sodowo-potasowej w utrzymywaniu różnicy potencjałów po obu stronach neurolemmy.

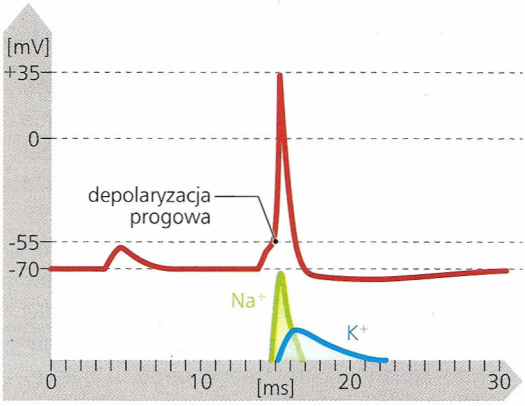
jony sodu nie mogą się swobodnie przemieszczać przez neurolemmę, na zewnątrz znajduje się więcej ładunków dodatnich, a wnętrze komórki jest naładowane ujemnie.

Potencjał czynnościowy

Charakterystyczną cechą komórki nerwowej jest to, że na podrażnienie reaguje ona pobudzeniem. Oznacza to, że istniejący potencjał spoczynkowy zostaje zastąpiony przez tak zwany **potencjał czynnościowy** (45.2.). W miejscu zadziałania bodźca (mechanicznego, fizycznego, chemicznego) w błonie neuronu otwierają się kanały dla jonów sodu, które zaczynają napływać do wnętrza komórki. Gwałtowność tego procesu prowadzi do chwilowego odwrócenia wartości ładunków po obu stronach błony, czyli do jej **depolaryzacji**. Pobudzenie, o ile było wystarczająco silne, przemieszcza się wzdłuż włókna nerwowego w postaci fali depolaryzacji błony. Stan przepuszczalności neurolemmy dla jonów sodu trwa zaledwie ułamek sekundy. Po przejściu impulsu nerwowego potencjał spoczynkowy w danym punkcie neuronu zostaje szybko przywrócony w wyniku uszczelnienia kanałów błonowych i podjęcia pracy przez pompę sodowo-potasową. Proces ten nosi nazwę **repolaryzacji** i prowadzi do odzyskania przez komórkę nerwową zdolności do ponownego pobudzenia.

Prawa przewodzenia:

1. Komórka nerwowa może zostać pobudzona w każdym swoim punkcie.
2. Pojedynczy akson komórki nerwowej ulega wzbudzeniu zgodnie z zasadą „wszystko albo nic". To znaczy, że jeśli bodziec nie osiągnie wartości potencjału czynnościowego, impuls nie zostanie przekazany.
3. Pobudzenie przemieszczające się w jednym włóknie nerwowym nie przenosi się na sąsiednie włókna dzięki izolującym właściwościom osłonek mielinowych.

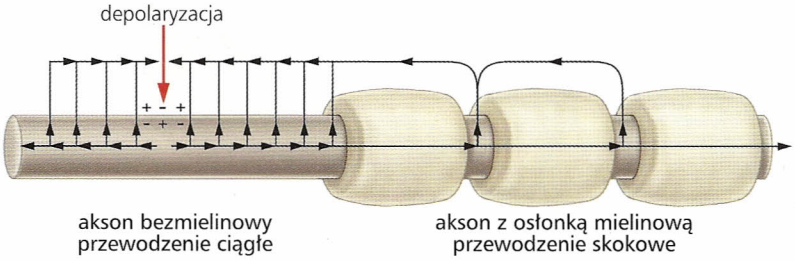


Źródło: J. Górski (red. nauk.), *Fizjologiczne podstawy wysiłku fizycznego*, PZWL, Warszawa 2008.

45.2. Pobudzenie neuronu bodźcem o odpowiedniej sile umożliwia osiągnięcie progu depolaryzacji i wygenerowanie potencjału czynnościowego. Poniżej potencjału zaznaczono zmiany przepuszczalności błony komórkowej dla jonów sodowych i potasowych zachodzące w trakcie pobudzenia.

4. Szybkość przewodzenia impulsu nerwowego jest wprost proporcjonalna do grubości włókna nerwowego (grube włókna przewodzą impulsy szybciej).
5. W momencie przekazywania impulsu nerwowego z jednego neuronu do drugiego za pośrednictwem synaps prędkość przekazywania impulsu ulega spowolnieniu. Zjawisko to nazywa się opóźnieniem synaptycznym.

Opisany mechanizm przemieszczania się impulsu nerwowego dotyczy neuronów pozbawionych osłonki mielinowej. Jednak aksony większości komórek nerwowych są w nią wyposażone. Odgrywa ona rolę izolatora, a jest wytwarzana przez oligodendrocyty należące do komórek glejowych. Jej obecność uniemożliwia rozprzestrzenianie się fali depolaryzacji błony w sposób ciągły. Wynika to z faktu, że **osłonka mielinowa** jest podzielona na odcinki, między którymi występują tak zwane **przewężenia Ranviera**. To przerwy w osłonce, które sprawiają, że impuls nerwowy jest przekazywany w **sposób skokowy** (od przewężenia do przewężenia), co znacznie zwiększa jego prędkość w porównaniu z włóknem pozbawionym osłonki (45.3.).



45.3. Mechanizm przewodnictwa ciągłego (po lewej) i skokowego (po prawej) w aksonie

Neuroprzekaźniki w układzie nerwowym

Impuls płynący wzdłuż włókna nerwowego dociera w pewnym momencie do zakończenia aksonu komórki nerwowej. Dalsze jego rozprzestrzenianie jest możliwe w wyniku przekazania na ciało, dendryt lub akson sąsiedniego neuronu. Miejsca, w których dochodzi do przekazania impulsu pomiędzy dwoma komórkami nerwowymi, określa się jako **synapsy** (45.4.). W najbardziej podstawowych synapsach chemicznych dochodzi do zmiany elektrycznego impulsu nerwowego na chemiczny sygnał neuroprzekaźnika, a w następnym neuronie ponownie na impuls elektryczny.

Typowa synapsa zbudowana jest z trzech zasadniczych elementów. Są to:

- **część presynaptyczna**, czyli kolbowatego kształtu zakończenie aksonu komórki przekazującej impuls nerwowy; są w nim obecne liczne drobne pęcherzyki zawierające neuroprzekaźniki (mediatory synaptyczne);
- **szczelina synaptyczna**, która oddziela dwa sąsiadujące neurony tworzące właściwą synapsę, w tej szczelinie znajdują się w liczne jony wapnia Ca^{2+};
- **część postsynaptyczna**, obszar neuronu odbierającego impuls, w którym pod wpływem neuroprzekaźników dochodzi do depolaryzacji błony, co jest równoznaczne z powstaniem potencjału czynnościowego.

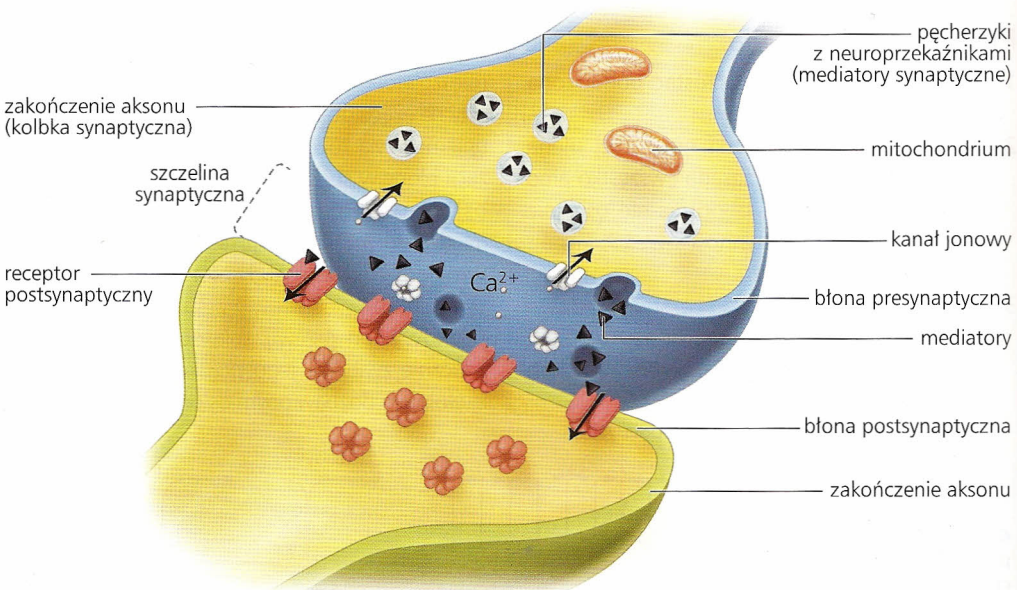
:: Ciekawostka

Neurony przekazują nie tylko informacje dotyczące jakości bodźca (proste przekazanie pobudzenia). Jego siłę (jak np. natężenie światła lub dźwięku) oddaje zwiększona częstotliwość impulsów nerwowych.

Rodzaje neuroprzekaźników

Neuroprzekaźnikiem nazywamy każdą substancję chemiczną, która uwalnia się z zakończenia komórki nerwowej, dyfunduje do obszaru szczeliny synaptycznej i może wzbudzić potencjał czynnościowy w błonie komórki docelowej. Łącząc się z odpowiednim receptorem w błonie postsynaptycznej neuronu, neuroprzekaźniki powodują otworzenie znajdujących się w niej kanałów sodowych, a to prowadzi do depolaryzacji błony. Jest to działanie, które odpowiada za opisane wcześniej przekazanie impulsu nerwowego z jednej komórki nerwowej do drugiej.

Część neurotransmiterów ma jednak odmienne działanie. Poprzez zwiększenie przepuszczal-



45.4. Mechanizm przekazywania impulsu w synapsie

ności błony postsynaptycznej dla jonów chlorkowych (Cl^-) powodują one zwiększenie wartości ujemnego potencjału wnętrza błony. Prowadzi to do jej nadmiernej polaryzacji (hiperpolaryzacji), co utrudnia powstanie potencjału czynnościowego.

Neuroprzekaźniki to bardzo duża grupa różnorodnych związków. Do najważniejszych należą: **acetylocholina**, **adrenalina**, **noradrenalina**, **dopamina**, **serotonina**, **GABA** (**kwas gamma-aminomasłowy**) i **glicyna**.

:: Ciekawostka

Impuls nerwowy rzadko jest przekazywany jedynie pomiędzy dwoma neuronami. Za pomocą synaps do ciała komórki nerwowej lub jej dendrytów przyłącza się zwykle wiele aksonów. Docierające za ich pośrednictwem krótkie impulsy nerwowe sumują się, a bodziec ulega wzmocnieniu lub wyciszeniu w zależności od charakteru neurotransmitera.

PODSUMOWANIE

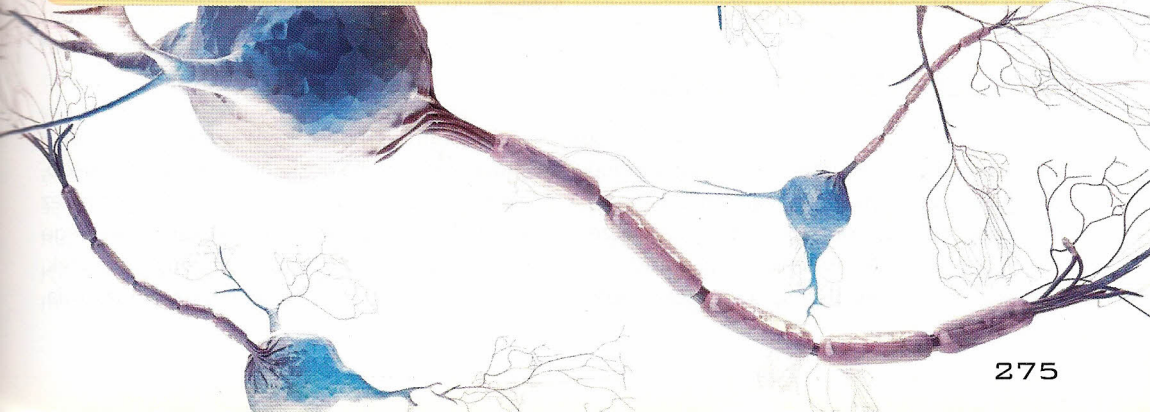
- Najważniejszą rolę w przewodzeniu impulsu nerwowego odgrywa błona plazmatyczna komórki nerwowej.
- Przewodzenie impulsu nerwowego jest możliwe dzięki polaryzacji błony neuronu, czyli dzięki istnieniu różnicy potencjałów pomiędzy jej częściami wewnętrzną a zewnętrzną.
- Wewnętrzna część błony neuronu jest naładowana ujemnie dzięki jonom chlorkowym oraz mniejszemu niż na zewnątrz stężeniu jonów sodowych.
- Różnica potencjału nazywana potencjałem spoczynkowym wynosi –70mV.
- Utrzymywanie różnicy stężeń jonów sodu i potasu po obu stronach neurolemmy jest możliwe głównie dzięki istnieniu pompy sodowo-potasowej.
- W reakcji na podrażnienie komórka nerwowa wytwarza potencjał czynnościowy, objawiający się jako depolaryzacja błony neuronu.
- W aksonach pozbawionych osłonki mielinowej impuls nerwowy przemieszcza się w sposób ciągły, a w zaopatrzonych w osłonkę mielinową – w sposób skokowy.
- Przekazywanie impulsu nerwowego w synapsach chemicznych odbywa się za pomocą neuroprzekaźników (neurotransmiterów).
- Do transmiterów synaptycznych należą: aceylocholina, adrenalina, noradrenalina, dopamina, serotonina, GABA (kwas gamma-aminomasłowy), glicyna.

ZADANIA

1. Wyjaśnij różnicę pomiędzy potencjałem spoczynkowym i czynnościowym.
2. Omów rolę pompy sodowo-potasowej w utrzymaniu polaryzacji błony neuronu.
3. Scharakteryzuj pięć praw przewodzenia impulsów nerwowych.
4. Wyjaśnij różnicę pomiędzy ciągłym a skokowym przewodzeniem impulsów nerwowych.

W INTERNECIE

- http://www.anatomia.webd.pl/nerwowy.html
- http://www.resmedica.pl/uklad-nerwowy/uklad-nerwowy

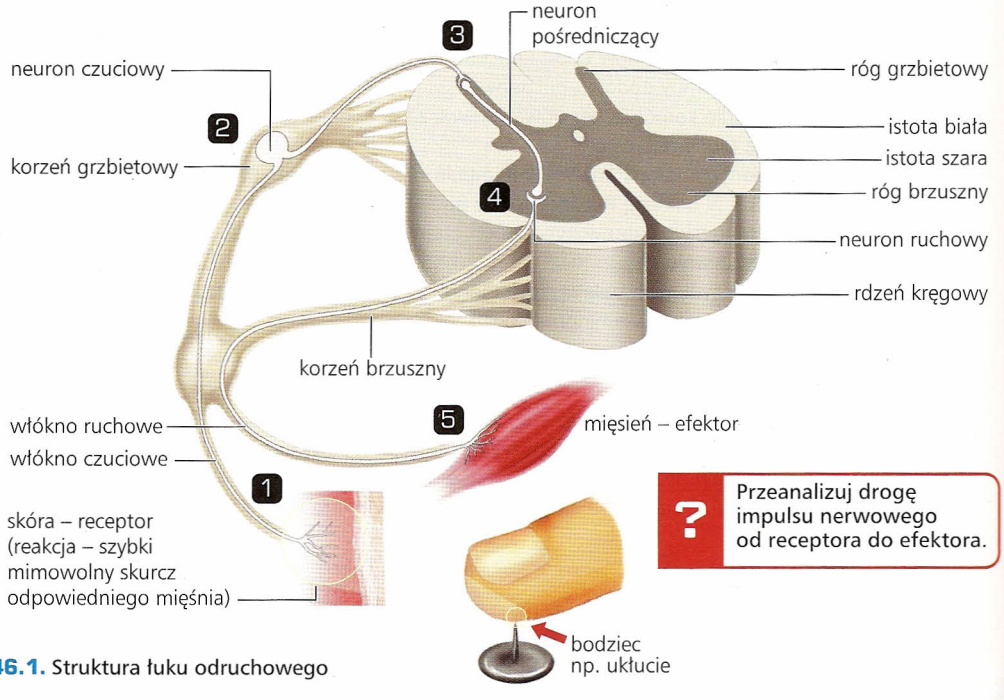


46. Funkcjonowanie układu nerwowego oraz łuk odruchowy

Budowa układu nerwowego, a także funkcje, które pełni, są niezwykle złożone. Mimo to istnieje elementarna jednostka czynnościowa układu nerwowego wspólna dla wszystkich przedstawicieli świata zwierzęcego (w tym człowieka). Jest nią **odruch**.

Mechanizm działania łuku odruchowego

Główne zadania układu nerwowego to odbieranie i analizowanie bodźców oraz uruchamianie odpowiedniej reakcji na nie. Najprostszą i najbardziej podstawową z nich jest odruch. To każda reakcja organizmu na bodziec wewnętrzny lub zewnętrzny, która zachodzi przy udziale ośrodkowego układu nerwowego i prowadzi do zmiany czynności ustroju. Drogę, którą przebywa impuls nerwowy w czasie odruchu, nazywa się łukiem odruchowym. Tworzą go: **receptor**, **droga nerwowa czuciowa** (aferentna), **ośrodek nerwowy** (np. w rdzeniu), **droga nerwowa ruchowa** (eferentna), **efektor**. Uszkodzenie któregokolwiek z tych elementów sprawia, że odruch nie może wystąpić **(46.1.)**. Pod względem funkcjonalnym odruchy można podzielić na: **bezwarunkowe** i **warunkowe**.



46.1. Struktura łuku odruchowego

? Przeanalizuj drogę impulsu nerwowego od receptora do efektora.

Odruchy bezwarunkowe

Nazywa się je również odruchami wrodzonymi lub gatunkowymi. Są one niepodlegającą modyfikacjom, przekazywaną dziedzicznie reakcją na określony bodziec, która stoi na straży bezpieczeństwa organizmu. W toku ewolucji te odruchy wykształciły się jako najkrótsze szlaki łączące receptory z efektorami. Typowy, bezwarunkowy łuk odruchowy zachodzi na poziomie rdzenia kręgowego, ale ten rodzaj odruchów może przebiegać przez każdy element centralnego układu nerwowego (rdzeń kręgowy, rdzeń przedłużony, móżdżek, międzymózgowie) z pominięciem kresomózgowia.

Przykłady odruchów bezwarunkowych:

- odruch bólowy – nagłe cofnięcie części ciała lub kończyny z obszaru działania bodźca bólowego (np. cofnięcie ręki z gorącego przedmiotu);
- odruch podeszwowy – odruchowe zgięcie palców stopy przy podrażnieniu części podeszwowej;
- odruch wymiotny – zwrócenie treści żołądka w wyniku podrażnienia tylnej ściany gardła;
- odruch kolanowy – nagłe wyprostowanie kończyny dolnej w stawie kolanowym w wyniku delikatnego uderzenia w ścięgno mięśnia czworogłowego;
- odruch źreniczny – zmiana wielkości źrenicy wskutek zmian natężenia światła (powiększenie źrenicy przy słabym oświetleniu, a zmniejszenie – przy silnym).

:: Ciekawostka

Noworodki wykazują odruchy bezwarunkowe, które z czasem zanikają na skutek integracji z innymi odruchowymi reakcjami organizmu. Przykładem bezwarunkowych odruchów noworodkowych są: odruch ssania (piersi), odruch chwytania oraz odruch Moro, nazywany również odruchem obejmowania.



Odruchy warunkowe

Odruchy warunkowe nazywane są również nabytymi lub osobniczymi. Pojawiają się w wyniku indywidualnych doświadczeń, nie podlegają zatem procesom dziedziczenia. Kluczową rolę w wytworzeniu tego rodzaju odruchu odgrywają (w przeciwieństwie do odruchów bezwarunkowych) ośrodki zlokalizowane w kresomózgowiu i korze mózgu. Klasyczne odruchy warunkowe rozwijają się na bazie odruchów bezwarunkowych, gdy towarzyszy im bodziec obojętny dla organizmu. W wyniku wielu powtórzeń rozwija się związek pomiędzy bodźcem bezwarunkowym a obojętnym, który staje się wówczas **bodźcem warunkowym**. Odruchy warunkowe są podstawą większości skomplikowanych czynności zamierzonych (jak np. chodzenie, jazda na rowerze czy rolkach, kierowanie samochodem). Pod wpływem bodźców środowiska te reakcje mogą zanikać lub ulegać zmianom.

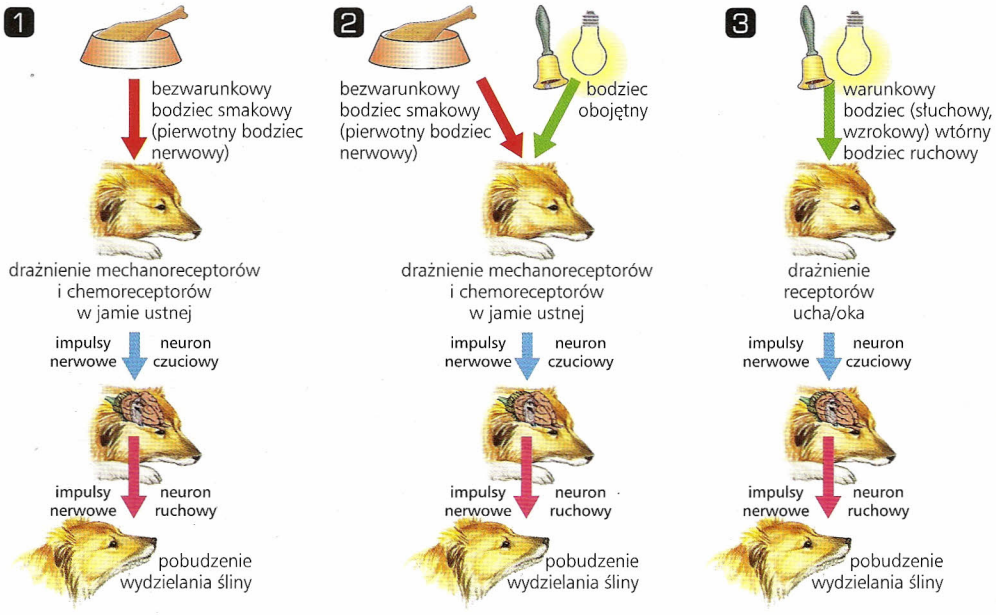
Dobrym przykładem odruchu warunkowego jest zwiększenie wydzielania śliny oraz soków trawiennych wywołane widokiem i zapachem pokarmu (noworodek, który nigdy nie jadł np. mięsa, nie będzie reagował w ten sposób).

Charakterystyka procesów uczenia się

Proces uczenia się jest nierozerwalnie związany z umiejętnością zapamiętywania. Polega na kumulowaniu doświadczeń, dzięki którym możliwe staje się modyfikowanie zachowania (behawioru) osobnika, co prowadzi do lepszego przystosowania się do środowiska. Ważną rolę w tym procesie odgrywa motywacja (dla zwierząt najczęściej stanowi ją zdobycie pokarmu, a dla człowieka – również ciekawość). Istotne są również indywidualne predyspozycje: pewnych rzeczy dana jednostka uczy się łatwiej (np. języków obcych), a innych – trudniej (np. przedmiotów ścisłych).

Rodzaje odruchów warunkowych. Prace Iwana Pawłowa

Klasyczne odruchy warunkowe powstają w wyniku powiązania bodźców obojętnych z naturalnymi reakcjami organizmu. Pod koniec XIX wieku rosyjski fizjolog Iwan Pawłow badał kształtowanie się odruchów, prowadząc doświadczenia na psach **(46.2.)**. Wykorzystał w tym celu bezwarunkowy odruch wydzielania śliny w wyniku zadziałania bodźca standardowego, czyli pokarmu. Skojarzył z nim bodziec obojętny, jakim był dzwonek włączany tuż przed każdym posiłkiem. Po wielu pró-



46.2. Schemat doświadczenia prowadzonego przez Iwana Pawłowa nad warunkowaniem klasycznym

bach zaobserwował ślinienie się psów na dźwięk dzwonka mimo braku jedzenia w pobliżu. Udało mu się zatem zastąpić bodziec pierwotny (pokarm) bodźcem wtórnym (dzwonkiem). Wytworzony w ten sposób typowy odruch warunkowy jest następstwem złożonego procesu uczenia się.

Charakterystyczną cechą **odruchów instrumentalnych** jest występowanie w nich reakcji ruchowej lub innych złożonych zachowań. Podstawą tego typu odruchów jest uczenie się poprzez obserwowanie konsekwencji, do jakich prowadzą określone zachowania. Jeśli ta reakcja w odpowiedzi na dany bodziec powoduje szkody, będzie występowała rzadziej (negatywny czynnik wzmacniający), gdy natomiast przynosi korzyść – częściej (pozytywny czynnik wzmacniający). Warunkowanie instrumentalne wykorzystuje się zwykle podczas tresury zwierząt.

Bardzo specyficznym typem uczenia się jest **wpajanie** (wdrukowywanie, imprinting). Występuje tylko w najwcześniejszym, krótkim okresie życia. Dzięki niemu możliwe jest zapamiętanie wyglądu osobników własnego gatunku lub rozpoznawanie rodziców. U człowieka przykładem wpajania jest więź wykształcająca się pomiędzy matką a dzieckiem tuż po narodzinach. Dobrze znanym przykładem wpajania jest też podążanie przez świeżo wyklute gęsi za pierwszym zaobserwowanym poruszającym się obiektem, który jest przez nie uznawany za rodzica.

Mechanizm zapamiętywania

Jak wspominano, mechanizm zapamiętywania informacji ma charakter skojarzeniowy. Oznacza to, że magazynowanie wiedzy i powstawanie wspomnień jest możliwe dzięki wytwarzaniu powiązań między nowymi a znanymi pojęciami czy faktami. Proces ten nosi nazwę kodowania, czyli wytwarzania **skojarzeń**. Podczas zapamiętywania nowego słowa (np. „spadochron") w mózgu jest wytwarzana sieć powiązań łącząca je z określonymi kategoriami (jak np.: powietrze, wysokość, niebezpieczeństwo, prędkość, ratunek, ptaki). Powstają więc połączenia nerwowe pomiędzy obszarami mózgu przechowującymi informację o odrębnych pojęciach. Takie oddziaływanie sąsiednich neuronów nazywa się **śladem pamięciowym**. Zapamiętane w ten sposób pojęcia pozostają „uśpione", dopóki jakieś skojarzenie nie przywoła ich do świadomości.

Dlaczego zapominamy?

Ludzka pamięć nie jest doskonała. Informacje zacierają się z czasem, a dostęp do nich przestaje być szybki i niezakłócony. Mimo że zapominanie ma wydźwięk negatywny (wiąże się ze stratą informacji), to jest procesem naturalnym lub wręcz niezbędnym. Umożliwia bowiem uporządkowanie posiadanej wiedzy i odciąża mózg, ponieważ pozbawia go nadmiaru niepotrzebnych informacji.

:: Ciekawostka

Ludzie cechujący się ponadprzeciętną pamięcią określani są jako mnemoniści. Najsłynniejszym z nich był rosyjski dziennikarz – Salomon Szereszewski. Badający go przez wiele lat Aleksander Łuria ustalił, że mózg Szereszewskiego zapamiętuje wszystko za pomocą bardzo plastycznych i obrazowych skojarzeń. Mnemonista doświadczał także wyraźnych wrażeń wzrokowych, słysząc dźwięk o określonej wysokości. Bez problemu zapamiętywał również skomplikowane wzory matematyczne, mimo że ich nie rozumiał.

PODSUMOWANIE



- Łuk odruchowy jest najprostszym i najszybszym sposobem reagowania na bodźce.
- Podstawowymi elementami odruchu są: receptor, droga nerwowa czuciowa, ośrodek nerwowy, droga nerwowa ruchowa, efektor.
- Pod względem funkcjonalnym odruchy dzieli się na bezwarunkowe i warunkowe.
- Odruchy bezwarunkowe stoją na straży bezpieczeństwa organizmu i są niepodlegającymi modyfikacjom, przekazywanymi dziedzicznie reakcjami na bodźce.
- Do typowych odruchów bezwarunkowych należą: odruch bólowy, podeszwowy, wymiotny, kolanowy, źreniczny.
- Odruchy warunkowe (inaczej: nabyte) są powiązane z procesem uczenia się.
- Odruchy warunkowe wiążą się z zapamiętywaniem, dlatego główną rolę w ich kształtowaniu odgrywają ośrodki zlokalizowane w kresomózgowiu.
- Iwan Pawłow był rosyjskim fizjologiem, który pod koniec XIX wieku zajmował się badaniem odruchów u psów. Udało mu się wytworzyć odruch warunkowy w postaci wydzielania przez psy śliny na dźwięk dzwonka, który towarzyszył przez dłuższy czas ich karmieniu. Obserwowane przez Pawłowa zjawisko nosi nazwę warunkowania klasycznego.
- Proces uczenia się jest ściśle powiązany z procesem zapamiętywania. Uczenie się może następować m.in. przez klasyczne odruchy warunkowe, odruchy instrumentalne oraz przez wgląd.
- Wyróżnia się dwa rodzaje pamięci: krótkotrwałą i długotrwałą.

ZADANIA



1. Scharakteryzuj elementy łuku odruchowego.
2. Porównaj odruchy bezwarunkowe i warunkowe.
3. Przeanalizuj badania prowadzone przez Iwana Pawłowa i oceń ich znaczenie.
4. Omów znane ci procesy uczenia się i zapamiętywania informacji.

BIBLIOGRAFIA



- Szczepańska-Sadowska E., Rużyłło W., Januszewicz W., Januszewicz A., *Układ nerwowy a choroby układu sercowo-naczyniowego*, Medycyna Praktyczna, 2009.

W INTERNECIE



- http://www.neurologiczne.pl/odruchy-fizjologia.htm

RODZAJE PAMIĘCI

Najważniejszym celem procesu uczenia się jest jak najtrwalsze zapamiętanie informacji. Aby do tego doszło, musi ona dotrzeć do świadomości, a następnie zostać powtórzona określoną liczbę razy. Ze względu na pojemność pamięci i czas przechowywania w niej informacji wyróżnia się dwa systemy pamięci przemijającej i cztery systemy pamięci trwałej.

Pamięć sensoryczna, ultrakrótka (USTM, ang. *ultra-short-term memory*)

To typ pamięci związany z postrzeganiem. Ze względu na rodzaj zapamiętywanych bodźców można wyróżnić pamięć ikoniczną (związaną ze wzrokiem) oraz echoiczną (związaną ze słuchem). Tak w jednej, jak w drugiej informacja jest przechowywana bardzo krótko (w pamięci ikonicznej – ok. 2 s, a w pamięci echoicznej – do 10 s).



Pamięć ikoniczna

Pamięć echoiczna



Pamięć sensoryczna

Pamięć krótkotrwała

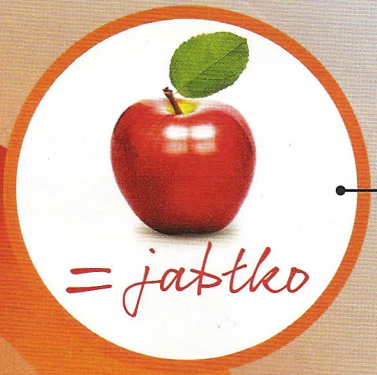
Pamięć trwała

Pamięć krótkotrwała (STM, ang. *short-term memory*)

Ten typ pamięci pozwala na nieco dłuższe przechowywanie informacji, utrwalonej najczęściej w wyniku powtarzania w myślach. Pamięć ta jest wykorzystywana na co dzień (np. w trakcie wybierania numeru telefonu sprawdzonego wcześniej w książce telefonicznej). Im częściej dana informacja jest powtarzana, tym większe prawdopodobieństwo, że zostanie skutecznie przeniesiona do pamięci trwałej. Pamięć krótkotrwała (podobnie jak sensoryczna) jest związana z przemieszczaniem się elektrycznego ładunku w obrębie grupy neuronów. Zatem brak powtórzeń spowoduje, że po niedługim czasie informacja ulegnie zatarciu (zostanie wymazana z pamięci).

Pamięć trwała

Pamięć trwała, w przeciwieństwie do krótkotrwałej, nie opiera się wyłącznie na przepływie impulsów elektrycznych, lecz polega na fizycznym wytworzeniu nowych szlaków łączących neurony. Kodowanie informacji w pamięci długotrwałej odbywa się poprzez jej wielokrotne powtarzanie. Dzięki temu między neuronami w mózgu powstają nowe połączenia. Wyróżnia się trzy podstawowe systemy pamięci długotrwałej: pamięć semantyczną, epizodyczną i proceduralną.



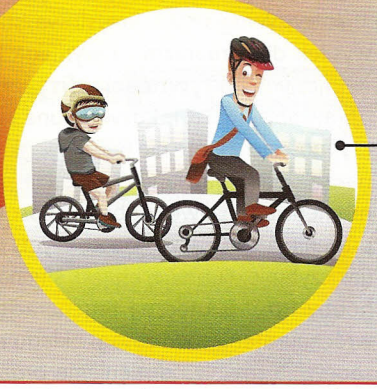
Pamięć semantyczna

Jest to system pamięciowy przechowujący informacje pozwalające na formułowanie i rozumienie określonych pojęć. To tutaj magazynowana jest wiedza o znaczeniu poszczególnych słów lub symboli i wzajemnych relacjach pomiędzy nimi. Informacje zawarte w pamięci semantycznej są nieustannie porządkowane i ściśle wiążą się z inteligencją danej osoby. Przypominają węzły ogromnej i skomplikowanej sieci, a zawarte w nich pojęcia łączą się ze sobą za pośrednictwem szlaków skojarzeniowych. Dlatego najlepszym sposobem na przypomnienie sobie informacji są skojarzenia.



Pamięć epizodyczna

Nazywana jest również pamięcią zdarzeń (np. związanych z 18. urodzinami czy ze śmiercią bliskiej osoby). Bazuje na chronologii, stanowi bowiem zapis informacji, które mają konkretną lokalizację przestrzenną i czasową. W przeciwieństwie do pamięci semantycznej pamięć epizodyczna jest ściśle powiązana z okolicznościami jej nabycia. Informacje zapisane w tym typie pamięci są trwałe i nie ulegają modyfikacjom.



Pamięć proceduralna (ruchowa)

To rodzaj pamięci długotrwałej bazującej na utrwalaniu wzorców ruchowych (jak np. jazda na rowerze, smarowanie chleba masłem, gra na instrumencie itd.). Pamięć proceduralna mieści się w obszarach mózgu związanych z układem ruchu, a dostęp do niej jest automatyczny. Tego typu operacje pamięciowe nie są uświadamiane, choć reakcja będąca ich skutkiem – tak (np. zawodowy kierowca wyprowadza samochód z poślizgu automatycznie, nie analizując poszczególnych etapów czynności).

? Jakie konsekwencje dla procesu uczenia się może mieć uszkodzenie hipokampu odpowiedzialnego za tworzenie pamięci krótkotrwałej?

47. Higiena układu nerwowego i znaczenie snu

Aby zachować **układ nerwowy** w dobrej kondycji, konieczne jest znalezienie odpowiednich proporcji pomiędzy intensywną pracą umysłową a odpoczynkiem. **Sen** jest najważniejszym, choć nie jedynym mechanizmem umożliwiającym regenerację zapasów energetycznych ustroju. Chroni organizm (a zwłaszcza układ nerwowy) przed nadmiernym obciążeniem. Dla neuronów, nieustannie stymulowanych w trakcie całodziennego, intensywnego przekazywania bodźców, sen jest szansą na powrót do pełnej sprawności czynnościowej.

Optymalne warunki do pracy układu nerwowego

W optymalnej sytuacji życie jednostki toczy się wokół względnie stałych warunków zewnętrznych, takich jak: szczęśliwa rodzina, udane życie towarzyskie, satysfakcjonująca praca czy hobby. Ta stabilizacja daje człowiekowi poczucie bezpieczeństwa, spokoju oraz pewności i jest podstawowym warunkiem **higieny układu nerwowego**.

Zachwianie tej optymalnej równowagi może doprowadzić do zaburzeń nerwowych (zwłaszcza u ludzi młodych, starszych lub wrażliwych). Pojawiają się one często w sytuacji, gdy człowiek zdaje sobie sprawę z tego, że wyuczone wcześniej umiejętności są nieprzydatne w sytuacji, w jakiej się znalazł (jak utrata pracy, choroba bliskiej osoby, narodziny dziecka). Wynikające z tego ograniczone możliwości adaptacji do nowych warunków środowiska prowadzą do pojawienia się **stanów depresyjnych**.

Zaburzenie psychicznej homeostazy wpływa na prawidłowe funkcjonowanie poszczególnych układów, a w konsekwencji – całego organizmu. Przekroczenie możliwości adaptacyjnych i znalezienie się w sytuacji bez wyjścia jest podłożem chronicznego stresu, prowadzącego do licznych patologii, jak: depresja, apatia, zaburzenia pracy serca (podwyższone i nieregularne tętno), nadciśnienie, upośledzenie odporności (zwiększające podatność na infekcje), a nawet choroby wrzodowe przewodu pokarmowego.

Podobnie jak długotrwały wysiłek osłabia mięśnie, tak przepracowanie układu nerwowego (zwłaszcza mózgu) skutkuje znużeniem. Jego objawami są: zawroty i ból głowy, spadek sprawności narządów zmysłów, obniżenie szybkości reakcji na bodźce. Te objawy to reakcja obronna przed przeciążeniem układu nerwowego **(47.1.)**.



47.1. Przeciążenie układu nerwowego zaburza funkcjonowanie wszystkich układów organizmu.

? Dlaczego sposobem na poprawę sprawności układu nerwowego jest aktywność fizyczna?

Długotrwałe znużenie prowadzi do przemęczenia, czyli stanu, w którym do przywrócenia sprawności układu nerwowego konieczny jest dłuższy odpoczynek od pracy umysłowej.

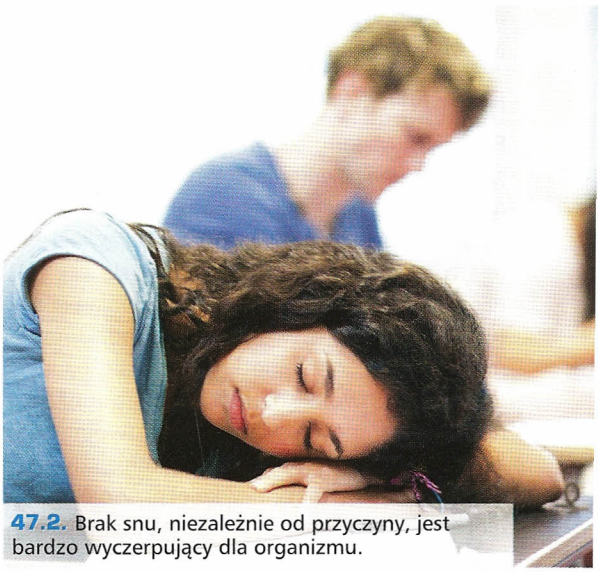
Intensywna praca umysłowa stanowi duży wysiłek dla organizmu i wymaga przerw wypełnionych **aktywnością fizyczną** (jak np. uprawianie sportu). Pozwala ona skupić się na czynnościach, które nie mają związku z pracą czy nauką. Jeśli uprawianie sportu nie jest w danym momencie możliwe, dobrym sposobem na odprężenie może być zajęcie się czymś przyjemnym (jak czytanie ulubionej książki, słuchanie muzyki, hobby itp.). Skuteczną regenerację sił i przywrócenie stanu równowagi układu nerwowego zapewnia również dotlenienie organizmu (np. w czasie spaceru) oraz zdrowy, trwający co najmniej osiem godzin sen.

Biologiczne znaczenie snu



Pod względem fizjologicznym sen jest szczególnym stanem czynnościowym organizmu, w którym kora mózgu traci łączność z otoczeniem. To stan **braku świadomości**, któremu towarzyszy bezruch, będący następstwem częściowego spadku napięcia mięśniowego. U osoby śpiącej spada częstotliwość oddechów, w wyniku czego tempo wymiany gazowej maleje o 10–15%. Prowadzi to do spadku tętna i ciśnienia krwi o 10–30 mmHg. Zmiany te mają charakter przejściowy i ustępują w momencie zadziałania czynników zewnętrznych (np. głośnego dźwięku).

Proces zapadania w sen jest regulowany zmianami natężenia światła w otoczeniu. Może być również uzależniony od innych bodźców docierających do układu nerwowego. Spokój, cisza i niewykonywanie absorbujących czynności sprzyjają zapadaniu w sen.

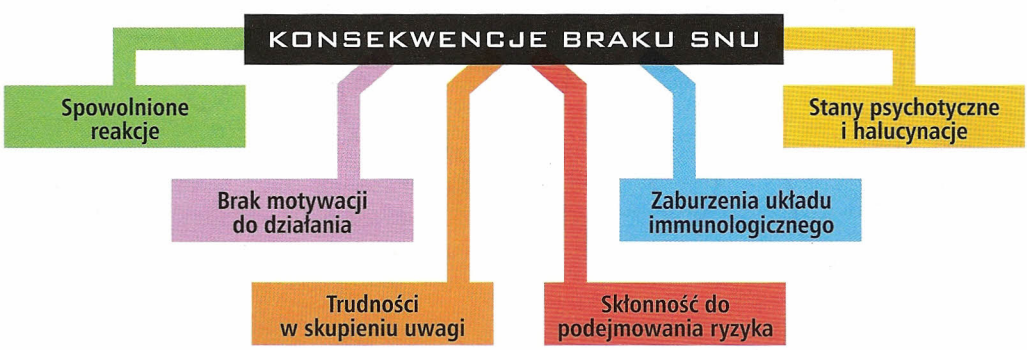


47.2. Brak snu, niezależnie od przyczyny, jest bardzo wyczerpujący dla organizmu.

Niedobory snu

Sen jest niezbędnym dla życia stanem fizjologicznym organizmu. Niedobory snu **(47.2.)** prowadzą do zaburzenia funkcji poznawczych i rozdrażnienia, a deprywacja trwająca dłuższy czas może nawet powodować cukrzycę. Długofalowe skutki braku snu to depresja i zwiększona zapadalność na różne choroby, wynikająca z zaburzenia funkcjonowania układu odpornościowego.

Do badania aktywności mózgu w czasie snu stosuje się elektroencefalograf. Za pomocą elektrod rozmieszczonych na głowie to urządzenie



rejestruje zmiany potencjału elektrycznego na powierzchni skóry, będące następstwem zmian aktywności neuronów kory mózgowej. Wynik badania przedstawiony jest w postaci wykresu nazywanego **elektroencefalogramem** (**EEG**).

Głębokość snu zmienia się w czasie jego trwania. Sposobem na jej zmierzenie jest użycie sygnału dźwiękowego o natężeniu, które powoduje obudzenie osoby śpiącej. Na podstawie badań wykazano, że sen jest najgłębszy w pierwszej, rzadziej drugiej godzinie po zaśnięciu. Pod względem fizjologicznym sen dzieli się na dwie fazy: NREM i REM.

Faza NREM

Faza NREM (ang. *non-rapid eye movement*) jest określana również jako sen głęboki lub wolnofalowy. Podczas niej zachodzi regeneracja sił witalnych organizmu. W mózgu pojawiają się fale o sukcesywnie zmniejszającej się częstotliwości (czyli alfa i delta). Faza ta pojawia się tuż po uśnięciu, a w jej trakcie spada tempo metabolizmu, ciśnienie krwi oraz liczba oddechów. Spowolnione jest również funkcjonowanie układów pokarmowego (wolniejsza perystaltyka jelit) i wydalniczego (mniejsza ilość produkowanego moczu). Z kolei przyspieszeniu ulegają procesy regeneracji tkanek (np. szybciej goją się rany).

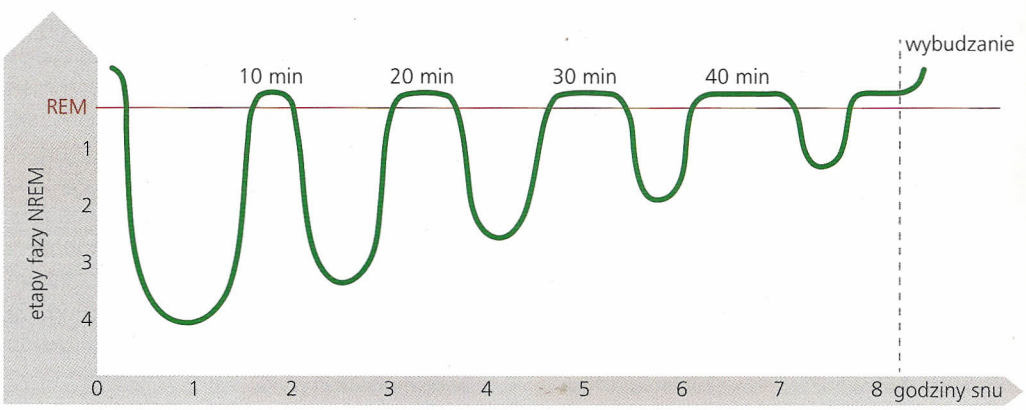
Faza NREM trwa 60–90 minut, po niej organizm przechodzi bezpośrednio w fazę REM (snu płytkiego), a następnie w kolejną fazę NREM. W czasie trwania normalnego ośmiogodzinnego snu fazy te pojawiają się naprzemiennie, przy czym fazy NREM stają się coraz krótsze i płytsze, a REM – dłuższe **(47.3.)**.

:: Ciekawostka

Bywa, że człowiek obudzony w czasie fazy REM doświadcza trwającego przez chwilę paraliżu sennego. Pomimo zupełnej świadomości osoba taka nie jest w stanie poruszyć żadną kończyną. Stan ten ustępuje po kilku sekundach.

Faza REM

Jest to tak zwana faza snu paradoksalnego lub faza szybkiego ruchu gałek ocznych (**REM**, ang. *rapid eye movement*). W jej trakcie wzrastają ciśnienie krwi, tempo oddechów oraz tętno. Charakterystyczne dla tej fazy są również marzenia senne. Nazwa „sen paradoksalny" jest spowodowana tym, że zapis EEG tej fazy snu wygląda, jakby dotyczył osoby obudzonej, chociaż pozostaje ona w stanie nieświadomości. Szybkie ruchy gałek ocznych, od których wzięła się druga nazwa tej fazy snu, są wywołane tym, że organizm stara się odbierać wrażenia doświadczane w marzeniu sennym (np. śledząc ruch występujących w nim obiektów). Aby nie doszło do uszkodzenia organizmu w następstwie powielania ruchów wykonywanych we śnie przez „wirtualne ciało", w czasie fazy REM dochodzi do atonii mięśni szkieletowych. Polega ona na zmniejszeniu ich zdolności do wykonywania skurczów i dość niefortunnie jest nazywana paraliżem sennym.



47.3. Hipnogram będący wykresem faz snu zdrowego człowieka

Zaburzenia snu

Bezsenność

Pojawia się w przebiegu pewnych zaburzeń czynności mózgu i niesie za sobą wiele zagrożeń **(47.4.)**. Szacuje się, że człowiek przesypia około jednej trzeciej swojego życia, jednak zapotrzebowanie na sen zmniejsza się z wiekiem. Noworodek musi spać nawet 21 godzin na dobę, sześciomiesięczne dziecko – 14 godzin, a czternastolatek – już tylko 12 godzin. Osoby dorosłe (od ukończenia 18. roku życia) potrzebują zaledwie ośmiu godzin snu dziennie. Niezależnie od skracającego się zapotrzebowania na sen, całkowity brak snu (czy to rozmyślny, czy spowodowany jego zaburzeniami) zawsze prowadzi do pojawienia się poważnych zaburzeń w ośrodkowym układzie nerwowym.



47.4. Bezsenność prowadzi do zaburzeń układu nerwowego.

:: Ciekawostka

Siedemnastoletni Randy Gardner był człowiekiem, który (nie stosując środków stymulujących) najdłużej pozostawał w stanie czuwania (przeciwieństwo snu). W 1964 roku pobił rekord, nie śpiąc przez 264 godziny, czyli ponad 11 dni! Lekarze, pod których kontrolą prowadzono eksperyment, zauważyli, że chłopak stał się nieufny i drażliwy. Pojawiły się też halucynacje oraz kłopoty z pamięcią i zdolnościami kalkulacyjnymi (poproszony o odejmowanie kolejnych siódemek od stu Gardner zatrzymał się na liczbie 65). Nie zaobserwowano innych zmian, a po zakończeniu eksperymentu jego uczestnik spał zadziwiająco krótko (14 godzin i 40 minut). Dotąd nikomu nie udało się pobić tego rekordu.

Przeprowadzono badania, w których osoby izolowane przez dłuższy czas od bodźców z zewnątrz (bez dostępu do okien, telewizora, radia, zegarów, telefonów) mogły wybierać moment budzenia się i zapadania w sen. Okazało się, że większość badanych funkcjonowała w rytmie dobowym o długości 24,2 godziny.

Somnambulizm

Jest bardziej znany pod nazwą **lunatyzmu** **(47.5.)**. Zaburzenie to dość często spotyka się u dzieci pomiędzy 12. a 14. rokiem życia (u dorosłych występuje ono rzadko). Choroba polega na tym, że osoba znajdująca się we śnie wstaje i przemieszcza się, wykonując przy tym różnorodne, schematyczne i wyuczone czynności (np. ubiera się, zawiązuje buty, zdejmuje z półek książki i zaczyna je czytać). Świadomość lunatyka jest wyłączona, nie może on zatem kontrolować swoich ruchów. Mimo to jego oczy pozostają otwarte i, co najciekawsze, działają tak, jak u osoby w pełni świadomej. Dzięki temu lunatyk sprawnie omija przeszkody, a nawet może czytać na głos i pisać. Osoby cierpiące na somnambulizm po przebudzeniu nie pamiętają swoich nocnych wypraw.



47.5. Lunatyzm

Zaburzenia i nieprawidłowości działania układu nerwowego

Depresja

Najczęściej spotykanym zaburzeniem psychicznym jest depresja **(47.6.)**. Osoby nią dotknięte charakteryzuje głębokie poczucie braku sensu życia. Stan ten jest obciążeniem nie tylko dla chorego, lecz także dla jego otoczenia (rodziny i przyjaciół). Na pojawienie się depresji wpływają negatywne doświadczenia życiowe, takie jak: przemoc w rodzinie, molestowanie seksualne w dzieciństwie, śmierć bliskiej osoby, utrata pracy. Typowymi objawami depresji są: obniżenie nastroju, niska samoocena, nerwowość, obojętność uczuciowa, myśli samobójcze oraz zaburzenia snu.



47.6. Depresja wprowadza olbrzymi dyskomfort w życie osoby na nią cierpiącej.

Schizofrenia

Przyczyny tej poważnej choroby psychicznej nie są do końca poznane. Uważa się, że największą rolę odgrywają czynniki genetyczne, powikłania okołoporodowe, procesy socjologiczne w dzieciństwie (np. patologie w rodzinie) oraz stosowane substancje uzależniające (np. amfetamina). Choroba dotyka około 0,6% populacji i objawia się głównie brakiem spójności w sferze emocji, myślenia oraz czynności poznawczych (nauki). U osób cierpiących na schizofrenię istnieje szczególnie wysokie ryzyko popełnienia samobójstwa **(47.7.)**.

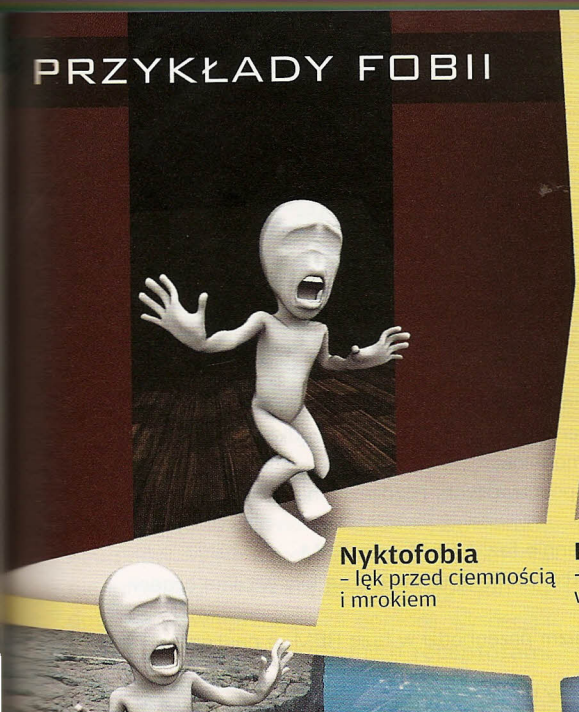
Lęki i fobie

To zaburzenia psychiczne objawiające się uporczywym lękiem przed zjawiskami, sytuacjami lub przedmiotami, które obiektywnie nie są niebezpieczne. Osoba cierpiąca na fobię (do czego przyznaje się 10% ludzi) unika sytuacji, która ją wywołuje. Wystąpienie okoliczności będących przyczyną lęku powoduje takie objawy, jak: przyspieszenie akcji serca, suchość w ustach i zachowania nieadekwatne do sytuacji (np. krzyk przerażenia na widok pająka). Fobie są całkowicie wyleczalne przy zastosowaniu zabiegów psychoterapeutycznych.



47.7. Schizofrenia jest bardzo poważną chorobą.

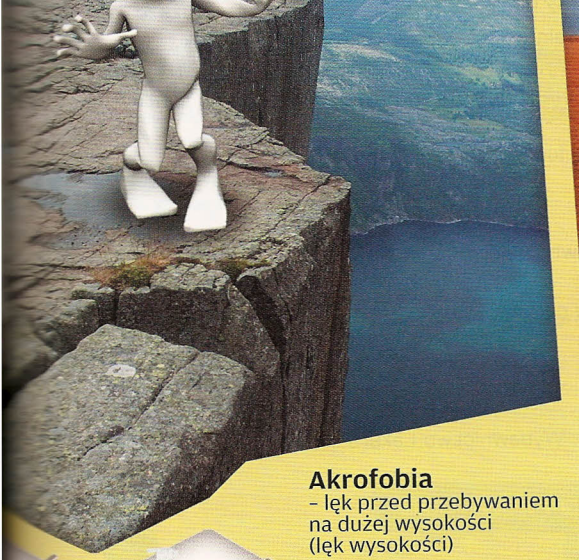
PRZYKŁADY FOBII



Nyktofobia
– lęk przed ciemnością i mrokiem



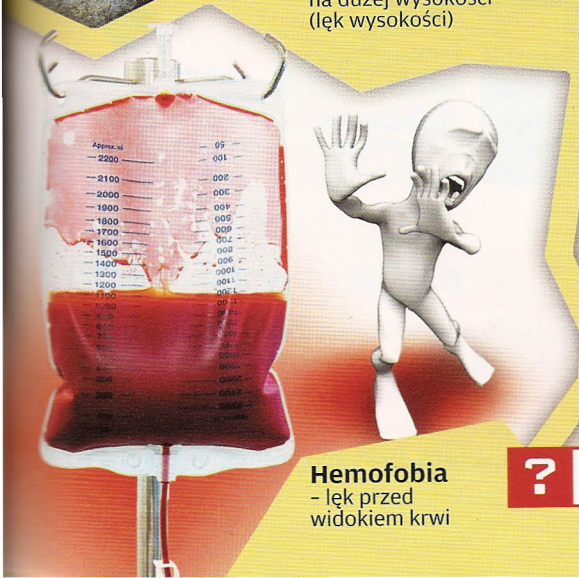
Klaustrofobia
– lęk przed zamknięciem w małej przestrzeni



Akrofobia
– lęk przed przebywaniem na dużej wysokości (lęk wysokości)



Agorafobia
– lęk przed przebywaniem na otwartej przestrzeni (często mylnie utożsamiany z lękiem wysokości)



Hemofobia
– lęk przed widokiem krwi



Arachnofobia
– lęk przed pająkami (jedno z częściej występujących zaburzeń lękowych)

? Jaką rolę pozytywną w życiu człowieka mogą odgrywać niektóre fobie?

PODSUMOWANIE



- Zbyt duże obciążenie układu nerwowego może doprowadzić do jego znużenia, a w konsekwencji – do przemęczenia.
- Sposoby na zachowanie odpowiedniej kondycji układu nerwowego to aktywność fizyczna, uprawianie sportu, słuchanie muzyki, hobby i sen.
- Sen to stan czynności kory mózgu, w którym dochodzi do utraty jej łączności z otoczeniem (czyli stan braku świadomości).
- Temu stanowi towarzyszy spadek napięcia mięśniowego, częstotliwości oddechów, tętna i ciśnienia krwi.
- Zapadanie w sen może być regulowane przez zmiany natężenia światła w otoczeniu.
- Sen ma olbrzymie znaczenie w regeneracji rezerw energetycznych, porządkowaniu wrażeń pamięciowych oraz w regulacji gospodarki hormonalnej.
- Niedobory snu prowadzą do zaburzenia funkcji poznawczych, rozdrażnienia, a niekiedy nawet do cukrzycy.
- Sen składa się dwóch następujących naprzemiennie faz: NREM oraz REM.
- Faza NREM to sen głęboki lub wolnofalowy, w którym regenerowane są siły witalne organizmu.
- Faza NREM trwa 60–90 minut, po czym organizm przechodzi w fazę REM, a następnie – w kolejną fazę NREM.
- W trakcie trwania snu fazy NREM stają się coraz krótsze i płytsze, a fazy REM – dłuższe.
- Faza REM nazywana jest też fazą snu paradoksalnego lub fazą szybkiego ruchu gałek ocznych.
- W fazie REM wzrastają ciśnienie krwi, tempo oddechów i tętno. Charakterystyczne dla tej fazy są marzenia senne.
- Do typowych zaburzeń snu należą bezsenność i lunatyzm.

ZADANIA



1. Scharakteryzuj znaczenie snu i opisz konsekwencje jego przedłużającego się niedoboru.
2. Porównaj poznane zaburzenia (choroby) układu nerwowego.
3. Scharakteryzuj fazy snu: NREM i REM.

BIBLIOGRAFIA



- Prusiński A., *Bezsenność i inne zaburzenia snu*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2007.

W INTERNECIE



- http://www.sen-24.pl/
- http://stres-info.com.pl/

48. Mechanizm percepcji bodźców. Budowa narządu wzroku

Każdy organizm zwierzęcy, aby móc funkcjonować w środowisku, musi zbierać informacje na jego temat. Mają one postać bodźców o różnym charakterze: mechanicznych, termicznych, chemicznych lub świetlnych. U prostych organizmów do odbioru bodźców wystarczą pojedyncze komórki nazywane **receptorami**. Duży, złożony organizm (np. człowiek) najczęściej korzysta z narządów zmysłów składających się z milionów komórek receptorowych.

Odbiór bodźców

Układ nerwowy człowieka składa się z miliardów neuronów. Wiele z nich odpowiada za odbieranie informacji ze świata zewnętrznego lub środowiska wewnętrznego za pomocą wyspecjalizowanych komórek nazywanych **receptorami**. Dzięki temu możliwe jest przetworzenie bodźców różnego typu (np. świetlne, dzwiękowe, chemiczne) na potencjał czynnościowy neuronu. Pozwala to układowi nerwowemu na reagowanie na te bodźce. Istnieje wiele rodzajów receptorów, które grupuje się według dwóch kryterów podziału: **lokalizacji** oraz **charakteru bodźca**.

LOKALIZACJA BODŹCA

Eksteroreceptory

Odbierają informacje z zewnątrz organizmu.

receptory wzroku, słuchu, smaku, węchu, czucia skórnego

Interoreceptory

Odbierają informacje z obszarów wewnętrznych organizmu. Ze względu na położenie dzieli się je na:

Wisceroreceptory

Receptory znajdujące się wewnątrz różnych narządów i informujące o ich stanie.

Proprioreceptory

Receptory obecne w narządach ruchu (stawach, mięśniach). Informują o położeniu ciała oraz części aparatu ruchu względem siebie.

Angioreceptory

Zbierają informacje o stanie środowiska wewnętrznego w naczyniach krwionośnych (jak pH, stężenie gazów).

CHARAKTER BODŹCA

Termoreceptory

Odbierają informacje o zmianach temperatury.

Chemoreceptory

Rozróżniają substancje chemiczne (receptory smaku, węchu).

Nocyreceptory

Proste zakończenia nerwowe, odbierają wrażenia bólowe.

Mechanoreceptory

Odbierają wrażenia mechaniczne (dotyk, nacisk, dźwięk).

Fotoreceptory

Odbierają bodźce w postaci światła o określonej długości fali.

Charakterystyka oka

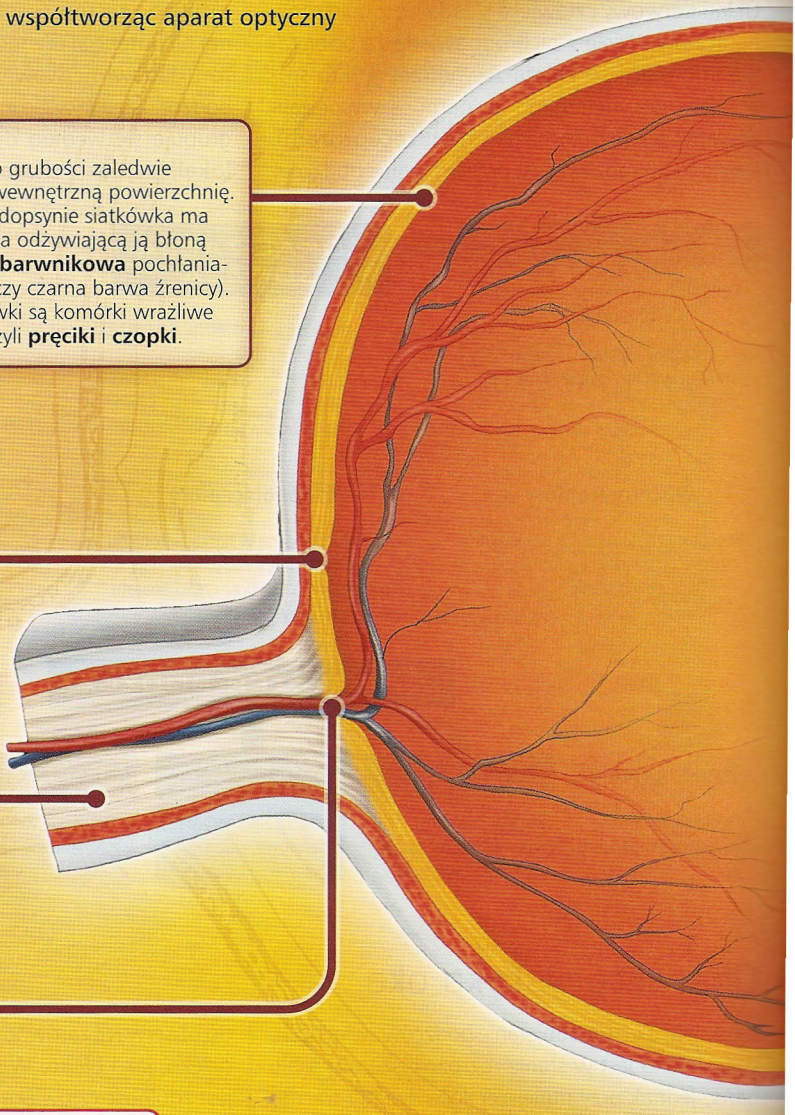
Zadaniem oka jest odbieranie bodźców świetlnych. Ludzkie oko jest w stanie rozróżnić szeroką skalę barw, jednak przy mniejszej ilości światła traci tę zdolność (np. po zmierzchu lub w nocy). Konstrukcja aparatu optycznego umożliwia adaptację oka do obserwacji zarówno przedmiotów położonych daleko, jak i blisko. Ważną zdobyczą ewolucyjną jest zdolność człowieka do widzenia trójwymiarowego (stereoskopowego), umożliwiającego ocenę głębi i odległości (np. od ofiary lub drapieżnika).

BUDOWA OKA

Najważniejszymi częściami narządu wzroku są parzyste **gałki oczne** oraz wybiegające z nich nerwy wzrokowe. Zlokalizowane są one w zagłębieniach czaszki nazywanych **oczodołami**. W oczodole znajdują się również mięśnie poruszające gałką oczną oraz aparat łzowy, zapewniający jej prawidłowe nawilżenie. Oba wymienione elementy są zaliczane do **narządów dodatkowych oka**. Należą do nich również **powieki**, chroniące gałkę oczną od przodu, oraz **spojówki**, **brwi** i **rzęsy**.

Gałka oczna przypomina kształtem lekko spłaszczoną kulę (o średnicy ok. 25 mm). Jej ściana jest zbudowana z trzech warstw: **błony włóknistej**, **błony naczyniowej** oraz **siatkówki**. W tylnej części oka warstwy te przylegają ściśle do siebie, a w części przedniej rozdzielają się, współtworząc aparat optyczny oka.

Siatkówka
Jest to światłoczuła warstwa oka (o grubości zaledwie 0,2–0,4 mm), która wyścieła jego wewnętrzną powierzchnię. Dzięki zawartej w jej komórkach rodopsynie siatkówka ma barwę bladoróżową. Pomiędzy nią a odżywiającą ją błoną naczyniową leży ciemna **warstwa barwnikowa** pochłaniająca światło (o jej obecności świadczy czarna barwa źrenicy). Najważniejszym elementem siatkówki są komórki wrażliwe na natężenie światła oraz barwy, czyli **pręciki** i **czopki**.

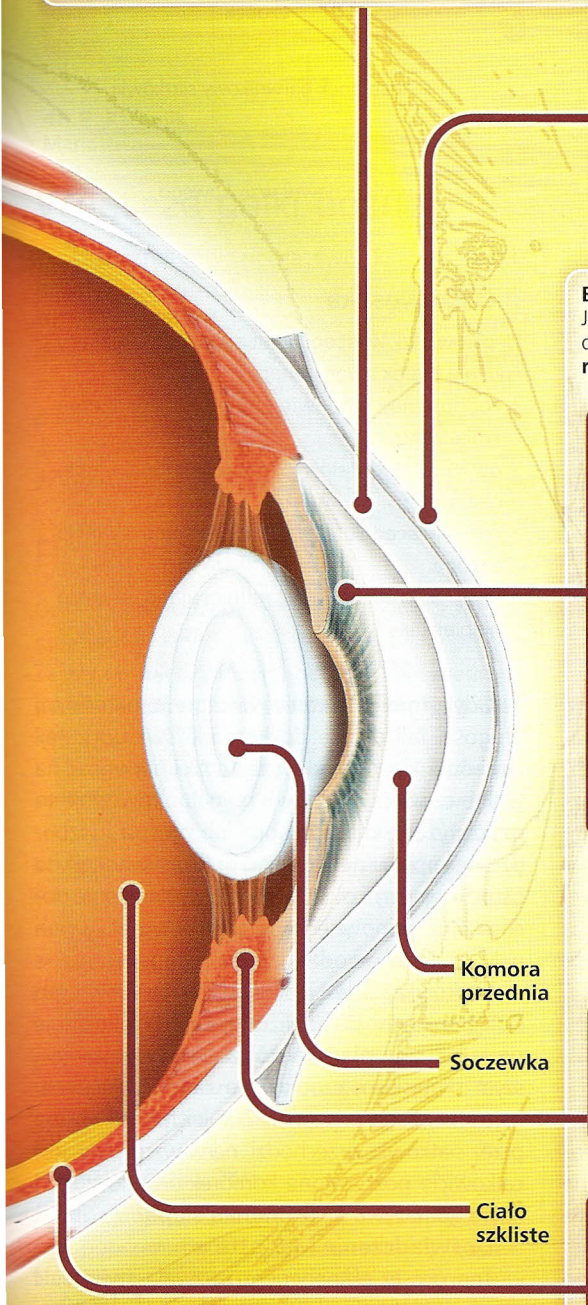


? Wyjaśnij przyczynę obecności w gałce ocznej tzw. plamki ślepej.

Błona włóknista
To najbardziej zewnętrzna, twarda i wytrzymała warstwa gałki ocznej. Jej tylna część (stanowiąca 80% powierzchni) jest nieprzezroczysta i nosi nazwę **twardówki**. Natomiast przezroczysta przednia część błony włóknistej (zajmująca ok. 20% jej powierzchni) to **rogówka**.

Twardówka
Zbudowana jest z licznych włókien tkanki łącznej. Głównym zadaniem twardówki jest ochrona gałki ocznej przed uszkodzeniami mechanicznymi, zwłaszcza powodowanymi przez kontakt ze strukturami kostnymi oczodołu.

Rogówka
To przeźroczysta część błony włóknistej. Zewnętrzną część rogówki stale pokrywa warstwa **cieczy łzowej**, chroniącej gałkę oczną przed drobnoustrojami i zanieczyszczeniami.

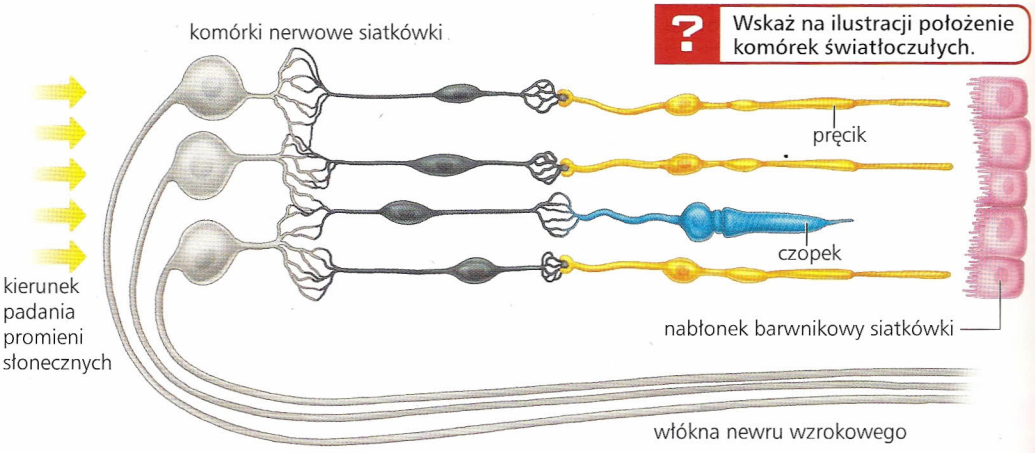


Błona naczyniowa
Jest to bogata w naczynia krwionośne warstwa oka dzieląca się na trzy części: **naczyniówkę**, **ciałko rzęskowe** oraz **tęczówkę**.

Tęczówka
Jest to położona z przodu i widoczna przez rogówkę część błony naczyniowej. Może ona przyjmować różną barwę (stąd nazwa):
od niebieskiej poprzez zieloną do brązowej, w zależności od warunkowanej genetycznie ilości barwnika (melaniny). Przestrzeń pomiędzy tęczówką a rogówką nazywana jest **komorą przednią oka**. Centralną część tęczówki zajmuje otwór o zmiennej średnicy, czyli źrenica. Głównym zadaniem tęczówki jest regulacja ilości światła wpadającego do wnętrza oka. Podobnie jak przysłona w aparacie fotograficznym, tęczówka rozszerza źrenicę przy małej ilości światła, a zwęża, gdy oświetlenie jest intensywne. Zmiany średnicy źrenicy są możliwe dzięki obecnym w tęczówce mięśniom, kontrolowanym przez autonomiczny układ nerwowy.

Ciałko rzęskowe
Najważniejszym jego elementem jest **mięsień rzęskowy**. Dzięki jego skurczom możliwa jest zmiana kształtu soczewki, a co za tym idzie – akomodacja oka.

Naczyniówka
Jest to tylna część błony naczyniowej, wyścielająca przestrzeń pomiędzy położoną od zewnątrz twardówką a siatkówką. Zbudowana jest z gęstej sieci włosowatych naczyń krwionośnych.



? Wskaż na ilustracji położenie komórek światłoczułych.

48.1. Struktura siatkówki oka

Pręciki

Pręciki to komórki odbierające informację o natężeniu światła **(48.1.)**. Działają nawet przy słabym oświetleniu i umożliwiają odbieranie przez korę wzrokową obrazów czarno-białych. Komórki te zlokalizowane są głównie w peryferyjnych strefach siatkówki oka. Wykazują dużą wrażliwość na światło (mogą zostać pobudzone nawet przez pojedynczy foton), ale informacje napływające z wielu pręcików są następnie łączone, co przekłada się na niską rozdzielczość obrazu.

Czopki

Występują trzy rodzaje czopków, reagujące na światło o różnej długości fali, to znaczy na światło czerwone (ok. 700 nm), zielone (ok. 530 nm) oraz niebieskie (ok. 420 nm). Czopki rozmieszczone są w nieregularnych skupiskach, przede wszystkim w centralnych częściach siatkówki. Dobre oświetlenie jest warunkiem prawidłowej pracy tych komórek: gdy natężenie światła maleje, mózg przestaje odbierać informację z czopków, a bazuje wyłącznie na tej napływającej z pręcików.

Mechanizm pobudzania komórek światłoczułych

Najważniejszym elementem obu rodzajów komórek siatkówki odbierającyech bodźce świetlne jest barwnik światłoczuły **rodopsyna**. Składa się on z białkowego składnika – opsyny oraz niebiałkowego komponentu – retinalu, będącego pochodną witaminy A.

:: Ciekawostka

U człowieka występują standardowo cztery rodzaje białek zwanych opsynami:

- rodopsyna, odpowiedzialna za widzenie zmierzchowe;
- opsyna długofalowa, odbierająca światło czerwone;
- opsyna średniofalowa, odbierająca światło zielone;
- opsyna krótkofalowa, odbierająca światło niebieskie.

Gdy promieniowanie świetlne o określonej długości fali dotrze do komórki światłoczułej, dochodzi do rozpadu cząsteczki barwnika na wolne cząsteczki opsyny i retinalu. Powoduje to depolaryzację błony czopka lub pręcika i wzbudzenie impulsu nerwowego przekazywanego do ośrodków wzrokowych w mózgu. Następnie dochodzi do ponownego połączenia opsyny i retinalu, a w efekcie odtworzenia rodopsyny.

Siatkówka nie jest jednakowo czuła we wszystkich punktach. W pobliżu jej centrum znajduje się tak zwana **plamka żółta**. Jest ona największym skupiskiem czopków, a zatem i miejscem najostrzejszego widzenia. Z kolei miejsce, gdzie przez siatkówkę przechodzi nerw wzrokowy, jest całkowicie pozbawione komórek światłoczułych i dlatego nazywa się je **plamką ślepą**.

Doświadczenie Mariotte'a

Ten prosty eksperyment pozwala stwierdzić obecność plamki ślepej. Należy zasłonić lewe

oko i patrzeć prawym na krzyżyk widoczny na rysunku (jak na poniższym kartoniku Mariotte'a) **(48.2.)**. Następnie należy przybliżać i oddalać rysunek. W pewnej odległości od oczu (mniej więcej 20 cm) z pola widzenia znika kółko! Jego obraz padł na plamkę ślepą, więc mózg nie odbiera informacji o jego obecności.

W obrazie odbieranym przez oczy nie ma ubytków w miejscu, gdzie promienie świetlne trafiają na plamkę ślepą. Jest to możliwe dzięki mechanice narządu wzroku, który znajduje się w ciągłym ruchu. Co chwilę inne fragmenty obrazu padają na plamkę ślepą, a mózg odpowiednio przetwarza te wrażenia, tworząc obraz pozbawiony luk.



48.2. Kartonik Mariotte'a

Wnętrze gałki ocznej

Gałka oczna zawdzięcza swój kształt wypełniającym ją substancjom. Są to: ciecz wodnista oraz ciało szkliste. Ciecz wodnista wypełnia przednią komorę oka, pomiędzy rogówką a soczewką. Największą część gałki ocznej (ok. 80%) zajmuje ciało szkliste, które odpowiada za utrzymanie odpowiedniego ciśnienia w jej wnętrzu. Ten przezroczysty twór o galaretowatej konsystencji ma również zdolność do załamywania światła.

Soczewka

To element oka odpowiedzialny za skupianie obrazu na siatkówce. Soczewka jest dwuwypukła, a dzięki działaniu mięśnia rzęskowego może zmieniać kształt.

Proces widzenia

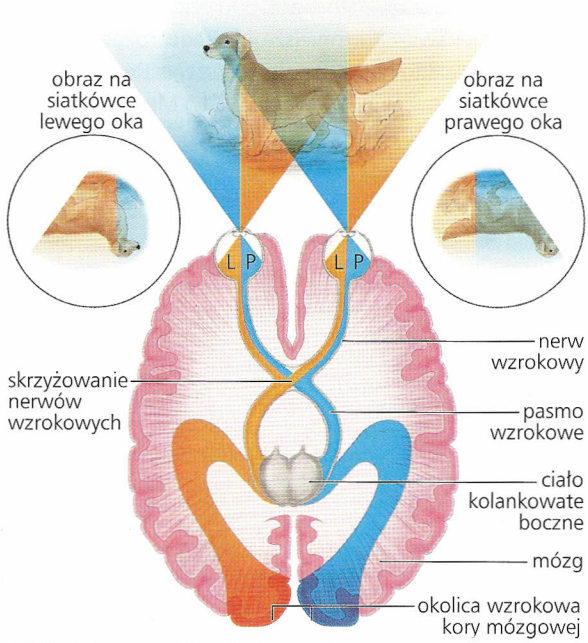
Odbieranie bodźców świetlnych i ich zamiana na impulsy nerwowe to skomplikowany proces. Zależy on między innymi od ilości fal świetlnych docierających do siatkówki, na co wpływa wielkość otworu źrenicznego.

Drogi wzrokowe łączące poszczególne obszary siatkówki z korą wzrokową przebiegają w różny sposób. Nerwy przewodzące impulsy z przyśrodkowych (od strony nosa) części oczu krzyżują się i docierają do przeciwnych półkul mózgu. Z kolei nerwy, którymi biegną impulsy z zewnętrznych obszarów gałek ocznych, się nie krzyżują. Impulsy docierające z każdego oka są analizowane w ośrodku wzrokowym, znajdującym się w płacie potylicznym kory mózgowej. Dzięki niewielkiemu przesunięciu obrazu widzianego przez oko lewe i prawe powstaje obraz trójwymiarowy **(48.3.)**.

Akomodacja oka

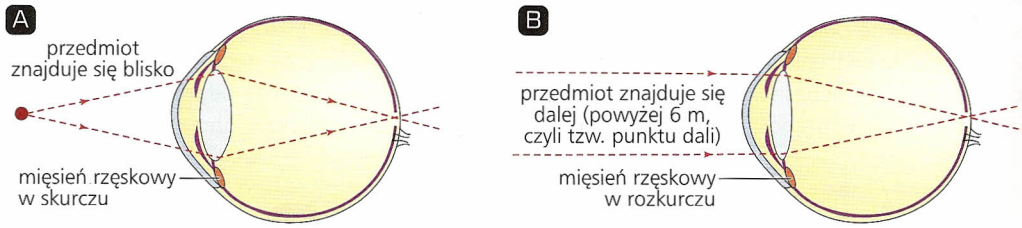
Jest to zjawisko adaptacji elementów optycznych oka poprzez regulację ich ogniskowej **(48.4.)**. Umożliwia ono ostre widzenie przedmiotów położonych w różnych odległościach od obser-

? Określ, do których części kory wzrokowej docierają poszczególne fragmenty obrazu.



48.3. Schemat widzenia dwuocznego (stereoskopowego)

watora. U człowieka akomodacja jest skutkiem zmiany kształtu soczewki oka w wyniku działania mięśnia rzęskowego, co wpływa na jej zdolności skupiające.



48.4. Zjawisko akomodacji oka: widzenie z bliska (A), widzenie z daleka (B)

Wady wzroku

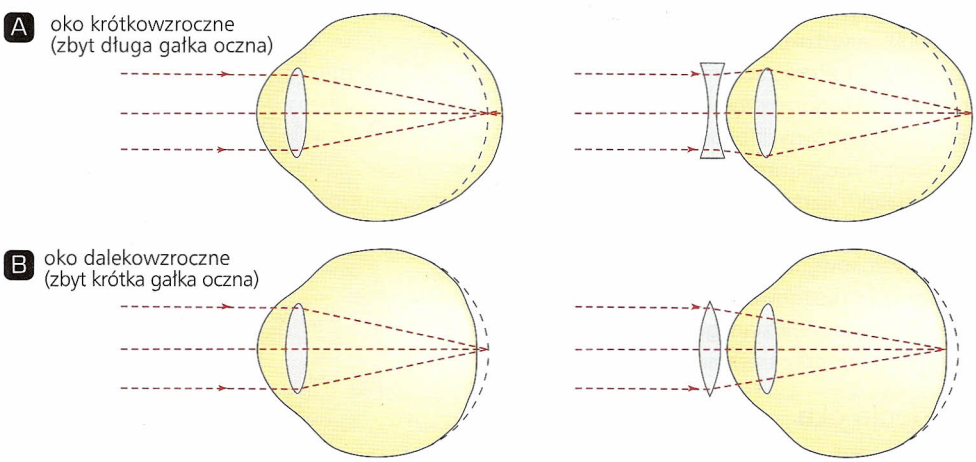
W prawidłowo działającym oku wszystkie elementy optyczne prawidłowo skupiają promienie świetlne na siatkówce, co w efekcie daje ostry obraz. Jednak oczy wielu osób funkcjonują nieprawidłowo. Można wyodrębnić trzy kategorie wad wzroku: krótkowzroczność, dalekowzroczność oraz astygmatyzm.

Krótkowzroczność

To najczęściej spotykany typ wady wzroku. Jest ona wynikiem nieprawidłowego skupiania promieni świetlnych (są one ogniskowane przed siatkówką) **(48.5.)**. Odruchowe mrużenie oczu przez krótkowidzów powoduje, że do oka wpada mniej światła i mniejsze jest jego rozproszenie. Pozwala to na uzyskanie większej ostrości obrazu i częściowe zniwelowanie wady. Mechanizm ten nie działa w nocy, dlatego wtedy osoby krótkowzroczne widzą gorzej. W celu przywrócenia prawidłowej ostrości wzroku stosuje się okulary korekcyjne wyposażone w rozpraszające soczewki wklęsło-wypukłe lub soczewki kontaktowe. Coraz bardziej popularne są również zabiegi laserowej korekcji wzroku. Polegają one na trwałej zmianie kształtu rogówki, co wpływa na stopień skupienia promieni świetlnych wpadających do oka.

Dalekowzroczność

Występuje rzadziej niż krótkowzroczność (często w podeszłym wieku). Jest zwykle następstwem skrócenia się gałki ocznej, w wyniku czego promienie świetlne skupiają się za siatkówką **(48.5.)**. W korekcji tej wady wzroku stosuje się skupiające soczewki dwuwypukłe lub soczewki kontaktowe.



48.5. Typowe dla oka krótkowzrocznego (A) i dalekowzrocznego (B) skupianie promieni świetlnych przed siatkówką i jego korekta

? Jakiego kształtu soczewki służą do korekcji krótkowzroczności?
Jaki kształt ma gałka oczna oka dalekowzrocznego w porównaniu z prawidłowo funkcjonującą gałką oczną?

Astygmatyzm

Jest to wada wzroku polegająca na braku symetrii elementów optycznych oka (rogówki lub soczewki). Osoba cierpiąca na astygmatyzm widzi nieostry obraz w pewnych obszarach pola widzenia.

Zaćma

Nazywana jest inaczej kataraktą i polega na zmętnieniu soczewki oka. Występuje dość często u osób w podeszłym wieku lub po przebytej infekcji. W skrajnych przypadkach konieczne jest leczenie polegające na wszczepieniu nowej, syntetycznej soczewki.

Jaskra

To poważna choroba narządu wzroku, polegająca na stopniowej i nieodwracalnej degeneracji nerwu wzrokowego i komórek siatkówki. Prowadzi do pogorszenia, a w późniejszym okresie – do utraty wzroku. Głównym czynnikiem powodującym uszkodzenia wzroku w przebiegu jaskry jest wzrastające ciśnienie śródgałkowe, dlatego leczenie polega na jego kontroli i odpowiedniej regulacji.

PODSUMOWANIE



- Zadaniem wielu komórek układu nerwowego jest odbieranie informacji z receptorów różniących się pod względem lokalizacji i charakteru odbieranego bodźca.
- Ze względu na lokalizację bodźca wyróżnia się eksteroreceptory (odbierające wrażenia z zewnątrz organizmu) i interoreceptory (odbierające informację z jego wnętrza).
- Ze względu na charakter odbieranego bodźca receptory dzieli się na: termoreceptory, chemoreceptory, nocyreceptory, mechanoreceptory oraz fotoreceptory.
- Najbardziej złożonym i najważniejszym narządem zmysłów człowieka jest oko.
- Najważniejszymi elementami narządu wzroku są gałki oczne położone w oczodołach.
- Do elementów narządu wzroku należą również: mięśnie poruszające gałką oczną, aparat łzowy oka oraz powieki, spojówki, brwi i rzęsy (zaliczane do narządów dodatkowych oka).
- Ściana gałki ocznej zbudowana jest z trzech warstw: błony włóknistej, błony naczyniowej oraz siatkówki.
- Zewnętrzna błona włóknista w tylnej części oka nosi nazwę twardówki (jest wytrzymała i nieprzejrzysta), w przedniej części oka natomiast przechodzi w przejrzystą rogówkę.
- Błona naczyniowa dzieli się na naczyniówkę, ciałko rzęskowe (tworzące mięsień rzęskowy) oraz tęczówkę.
- Siatkówka jest najbardziej wewnętrznie położoną warstwą oka, zawierającą komórki światłoczułe – pręciki i czopki.
- Pręciki odpowiadają za odbieranie informacji o zmianach natężenia światła, natomiast czopki przekazują informację o kolorach.
- Najważniejszym elementem komórek odbierających bodźce świetlne jest barwnik światłoczuły rodopsyna.
- Do najczęstszych wad wzroku należą krótkowzroczność, dalekowzroczność oraz astygmatyzm, natomiast do przewlekłych chorób oczu – zaćma i jaskra.

ZADANIA



1. Podziel receptory pod względem lokalizacji i charakteru bodźca.
2. Opisz warstwy budujące gałkę oczną, z uwzględnieniem ich funkcji w tylnej i przedniej części oka.
3. Przedstaw mechanizm pobudzania światłoczułych komórek siatkówki oka.
4. Porównaj znane ci wady i choroby narządu wzroku.

BIBLIOGRAFIA



- Jakimowicz-Klein B., *Zdrowe oczy Pytania i odpowiedzi*, Wydawnictwo Astrum, 2005.
- Opracowanie zbiorowe pod redakcją Konturka S.J., *Podstawy fizjologii człowieka – układ nerwowy i narządy zmysłów*, Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2010.
- Morawski P., *Oczy Poradnik zdrowia*, Skarbnica Wiedzy 2005.

49. Budowa narządu słuchu

Słuch to drugi, po wzroku, najważniejszy zmysł człowieka. **Słuchem** nazywa się wrażliwość na **bodźce dźwiękowe**, których źródłem są fale rozchodzące się w ciałach sprężystych (stałych, ciekłych lub gazowych). Bodźce te są odbierane za pośrednictwem narządu słuchu. Jest on eksteroreceptorem, który wychwytuje drgania powietrza w kanale słuchowym i zamienia je na impulsy nerwowe, uświadamiane później jako dźwięki.

Narząd słuchu i równowagi

Człowiek odbiera wrażenia dźwiękowe za pośrednictwem uszu. Pełnią one funkcje nie tylko narządu słuchu, lecz także równowagi. Ucho ma złożoną budowę, w której można wyróżnić trzy zasadnicze części: **ucho zewnętrzne** (zbierające dźwięki), **ucho środkowe** (wzmacniające dźwięki) oraz **ucho wewnętrzne** (przetwarzające fale akustyczne na impulsy nerwowe oraz ustalające położenie głowy).

Wrażenia słuchowe

Dźwięki to fale akustyczne powstające wskutek drgania cząsteczek powietrza. Wysokość amplitudy drgań decyduje o głośności dźwięku mierzonej w decybelach (dB). Z kolei ilość drgań przypadających na sekundę to częstotliwość mierzona w hercach (Hz). Wskazuje ona na wysokość dźwięku (im wyższa częstotliwość, tym wyższy dźwięk). Ucho człowieka wychwytuje dźwięki o częstotliwości od 16 do 20 000 Hz, a najwyższą czułość wykazuje przy częstotliwości od 1000 do 3000 Hz. Wraz z wiekiem zmniejsza się zakres słyszalności dźwięków o wysokiej częstotliwości (niezależnie od wykonywanej pracy i poziomu hałasu).

:: Ciekawostka

Fakt zmniejszania się wrażliwości słuchu wykorzystał w 2005 roku Howard Stapleton. Skonstruował on urządzenie emitujące dźwięki o częstotliwościach powyżej 17 400 Hz. Tak zwany moskit miał skutecznie zniechęcać młodzież do gromadzenia się w miejscach publicznych. Wytwarzany przez moskita dźwięk jest słyszalny jedynie dla osób poniżej 24. roku życia i ma nieprzyjemne brzmienie (przypomina brzęczenie komara). Urządzenie wzbudza kontrowersje jako łamiące prawa człowieka, ale ma wielu zwolenników.

Budowa ucha zewnętrznego

Ucho zewnętrzne odgrywa rolę odbiornika, którego zewnętrzną część stanowi małżowina uszna zbudowana z tkanki chrzęstnej (49.1.). Jej zadaniem jest wychwytywanie dźwięków i kierowanie ich do przewodu słuchowego prowadzącego do błony bębenkowej. Znajdujące się w jego ścianach komórki wydzielają **woskowinę**, czyli substancję zapobiegającą nadmiernemu łuszczeniu się i wysuszeniu wyścielającej go skóry. Błona bębenkowa mieszcząca się na końcu przewodu słuchowego odgranicza ucho zewnętrzne od leżącego głębiej ucha środkowego. Dźwięki docierające do błony bębenkowej wprawiają ją w drgania, które przenoszą się następnie na kostne elementy ucha środkowego, pełniące funkcję wzmacniacza dźwięków.



49.1. Małżowina uszna wraz z kanałem słuchowym zewnętrznym pełnią funkcję anteny zbierającej dźwięki.

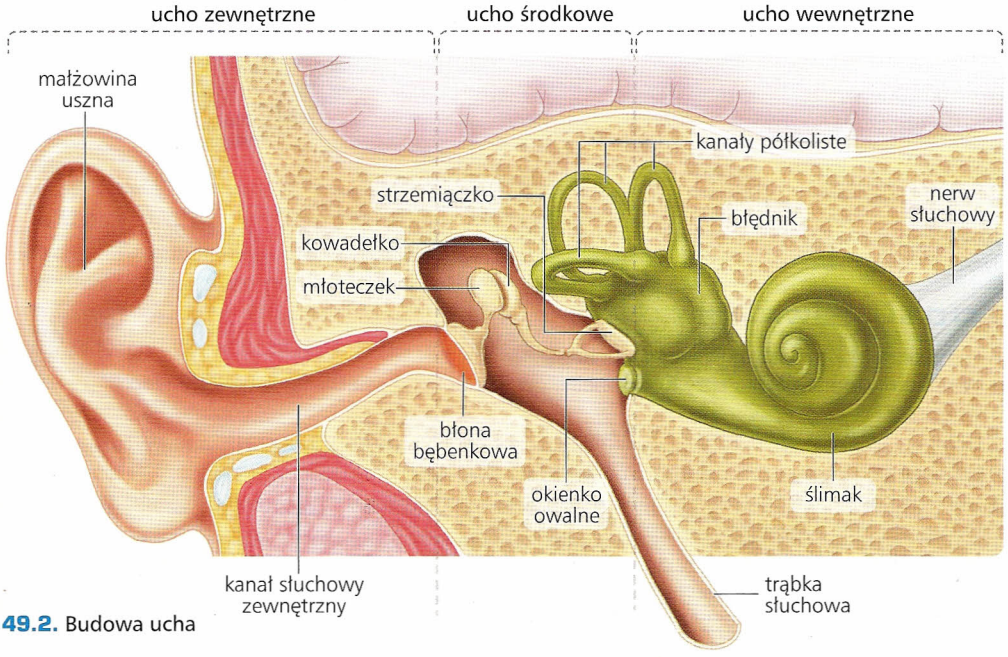
Budowa ucha środkowego

Bezpośrednio do wewnętrznej części błony bębenkowej przylega **młoteczek** – pierwsza z trzech kosteczek słuchowych. Młoteczek łączy się stawowo z **kowadełkiem** (49.2.). Kowadełko jest połączone stawowo z leżącym bliżej ucha wewnętrznego **strzemiączkiem**. Stanowi ono ostatnią kosteczkę słuchową ucha środkowego, odpowiedzialną za przenoszenie drgań błony bębenkowej do ucha wewnętrznego. Jego podstawa styka się z błoną okienka owalnego prowadzącego do wnętrza ślimaka, który stanowi trzon ucha wewnętrznego.

Bardzo ważnym elementem ucha środkowego jest również **trąbka Eustachiusza**, czyli kanał (długości ok. 3–4 cm) łączący jamę ucha środkowego z górną częścią gardła. Zadaniem tego kanału jest wyrównywanie ciśnienia po obu stronach błony bębenkowej.

:: Ciekawostka

Strzemiączko jest najstarszą ewolucyjnie kostką słuchową. Po raz pierwszy pojawiło się u wczesnych zwierząt lądowych, u których ze względu na kształt było nazywane kolumienką. Współczesna nazwa tej kosteczki słuchowej odnosi się do jej kształtu przypominającego strzemię siodła do jazdy konnej.

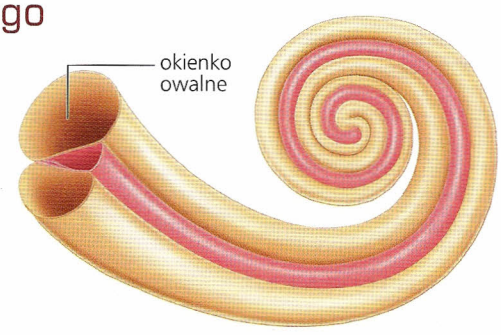


49.2. Budowa ucha

Budowa ucha wewnętrznego

Ucho wewnętrzne jest również nazywane **błędnikiem** (ze względu na skomplikowany kształt, przypominający labirynt). Stanowi właściwy receptorowy narząd słuchu i równowagi, który funkcjonalnie składa się z trzech części. Są to:

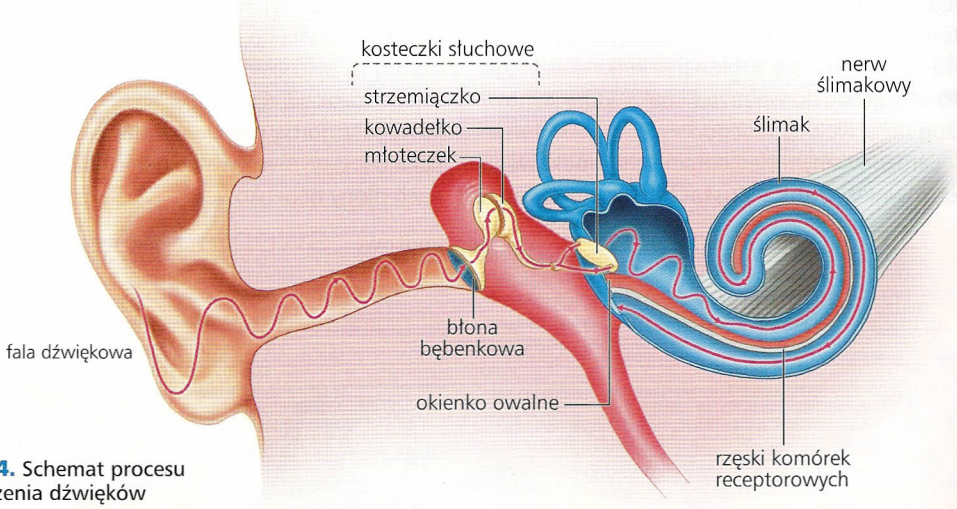
- **przedsionek** (rozpoczynający się okienkiem owalnym);
- **kanały półkoliste** odpowiadający za zbieranie informacji o położeniu ciała (jego funkcję szerzej omówiono w rozdziale 50.);
- **ślimak** (właściwy narządu słuchu) (49.3.).



49.3. Struktura ślimaka (na ilustracji widać wzajemny przebieg trzech kanałów go tworzących)

Narząd słuchu

Właściwą częścią narządu słuchu jest ślimak. Zewnętrznie tworzy go kostne rusztowanie przypominające kształtem muszlę ślimaka. Wewnątrz tego rusztowania przebiega przewód ślimakowy, zbudowany z trzech zwężających się i spiralnie zawiniętych kanałów wypełnionych płynem. Drgania wzmocnione przez kosteczki słuchowe zostają przeniesione na okienko owalne. Wywołuje to drgania płynu w kanałach ślimaka, co powoduje pobudzenie receptora słuchu – **narządu Cortiego**. Tworzą go komórki zaopatrzone w rzęski. Drgania płynu wypełniającego ślimak powodują ruch rzęsek komórek czuciowych. Powoduje to depolaryzację błony tych komórek i wytworzenie potencjału czynnościowego **(49.4.)**.



49.4. Schemat procesu słyszenia dźwięków

PODSUMOWANIE

- Narządem słuchu i równowagi jest ucho.
- W uchu można wyróżnić trzy funkcjonalne części: ucho zewnętrzne, środkowe oraz wewnętrzne.
- Ucho człowieka wychwytuje dźwięki o częstotliwości od 16 do 20 000 Hz, a najwyższą czułość wykazuje przy częstotliwości od 1000 do 3000 Hz.
- Ucho zewnętrzne składa się z małżowiny usznej i przewodu słuchowego, na którego końcu mieści się błona bębenkowa.
- Elementami ucha środkowego są trzy kosteczki słuchowe: młoteczek, kowadełko i strzemiączko. To najmniejsze kości człowieka, a ich zadaniem jest wzmacnianie dźwięków docierających do błony bębenkowej przewodem słuchowym.
- Ucho wewnętrzne (nazywane błędnikiem) składa się z przedsionka, kanałów półkolistych oraz ślimaka.
- Ruch błony okienka owalnego powoduje drgania płynu w kanałach ślimaka. Pobudzają one narząd Cortiego położony w kanale ślimakowym.

ZADANIA

1. Oceń funkcję, jaką pełni występująca w uchu środkowym trąbka Eustachiusza.
2. Wymień i scharakteryzuj elementy ucha wewnętrznego.
3. Omów mechanizm pobudzenia komórek receptorowych w narządzie Cortiego.

BIBLIOGRAFIA

- Szeląg E., Szymaszek A., *Test do badania słuchu fonematycznego dzieci i dorosłych*, Gdańskie Wydawnictwo Psychologiczne, 2006.

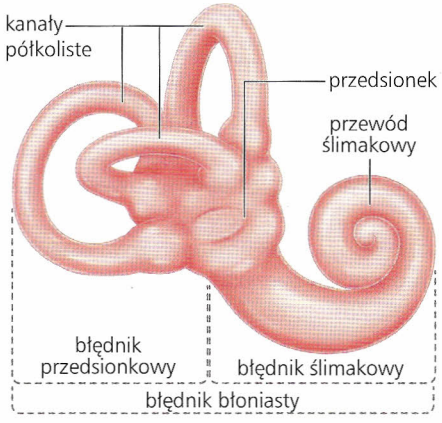
50. Narząd równowagi, zmysł smaku i węchu

Większość bodźców dociera do ośrodkowego układu nerwowego i świadomości jako wrażenia wzrokowe i słuchowe. Aby jednak obraz otaczającego świata odbierany przez człowieka był kompletny, został on wyposażony również w **zmysły równowagi**, **smaku** i **węchu**.

Narząd równowagi

Zmysł równowagi ma kluczowe znaczenie dla zachowania się organizmu w środowisku, umożliwia bowiem odczuwanie zmian położenia ciała i ruchów głowy w przestrzeni. Główne elementy narządu równowagi człowieka znajdują się w uchu wewnętrznym (50.1.). Właściwy zmysł równowagi w błędniku błoniastym tworzą **trzy kanały półkoliste** oraz struktura nazywana **przedsionkiem.**

? Wyjaśnij, dlaczego pewne rodzaje dźwięków mogą powodować zawroty głowy.



50.1. Struktura błędnika błoniastego

Kanały półkoliste

Są to kanały biegnące w trzech niemal prostopadłych płaszczyznach. Ruch głowy w którejkolwiek z trzech płaszczyzn powoduje ruch płynu w odpowiednim kanale. Efektem jest ruch rzęsek komórek receptorowych i przesłanie do mózgu impulsu nerwowego, dostarczającego informacji o charakterze tego ruchu.

Przedsionek

Błona wewnętrzna przedsionka pokryta jest olbrzymią ilością kryształków węglanu i fosforanu wapnia nazywanych **otolitami** (50.2.). W trakcie ruchu ciała otolity przesuwają się po powierzchni błony (podobnie jak nieumocowane przedmioty poruszają się wewnątrz gwałtownie hamującego samochodu). Powoduje to odchylenie rzęsek komórek czuciowych błony, co prowadzi do powstania potencjału czynnościowego w neuronach związanych z tymi komórkami. Jest on następnie przekazywany do mózgu, dostarczając informacji o pozycji głowy (również w momencie, gdy ruch już ustanie).



50.2. Obraz SEM przedstawiający otolity w uchu wewnętrznym człowieka

:: Ciekawostka

Narząd równowagi ma tak zwany okres bezwładności, który wynosi od 5 do 30 sekund. Jest on związany z nagłą zmianą przyspieszenia działającego na człowieka (np. po gwałtownym hamowaniu samochodu przez pewien czas trwa wrażenie ruchu).

? Opisz rolę otolitów w odbieraniu informacji o zmianach położenia ciała.

Narząd smaku

Receptory odbierające bodźce smakowe są zgrupowane w **kubkach smakowych**, które w największej ilości (kilka tysięcy) są rozmieszczone w nabłonku języka (w tzw. brodawkach językowych) **(50.3.)**. Przestrzenie pomiędzy brodawkami językowymi są zajęte przez gruczoły, których płynna wydzielina przepłukuje brodawki, dzięki czemu utrzymuje je w ciągłej gotowości do odbioru nowych bodźców smakowych.

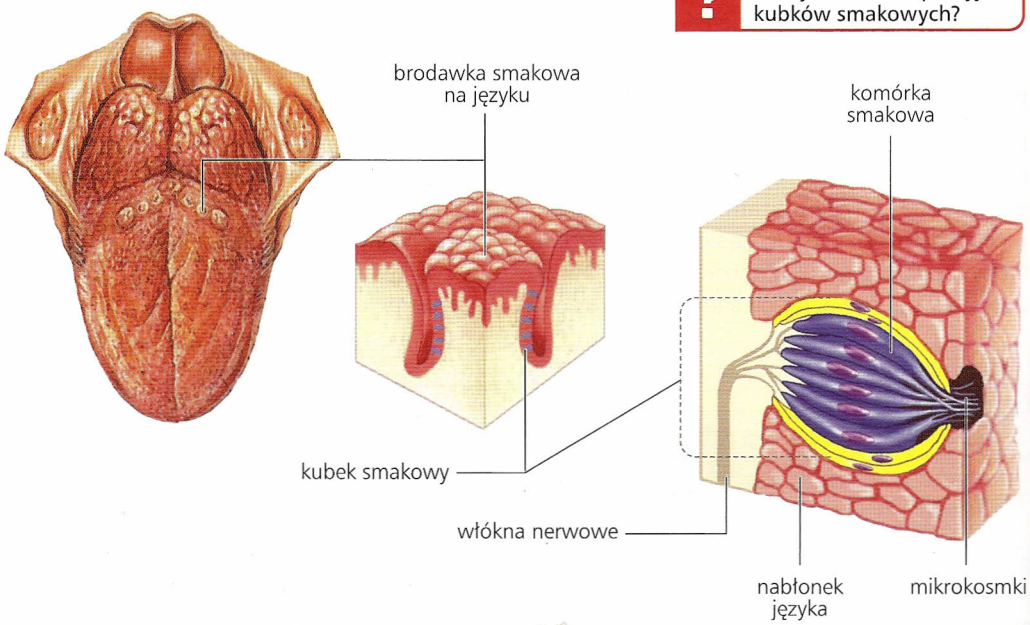
Kubek smakowy ma postać jamki, w której znajdują się komórki receptorowe. Związki chemiczne rozpuszczone w ślinie wnikają do komórek receptorowych na drodze dyfuzji, powodując ich pobudzenie.

Istnieją różne rodzaje receptorów smakowych, reagujących w wybiórczy sposób na substancje o odmiennej strukturze chemicznej. Ilość tych substancji jest praktycznie nieograniczona, jednak udało się wyróżnić pięć podstawowych smaków rozróżnianych przez człowieka: gorzki, słony, słodki, kwaśny i smak umami. Nazwa ostatniego z nich pochodzi z języka japońskiego i oznacza „mięsny". Została ona nadana przez japońskich naukowców, którzy niedawno potwierdzili istnienie tego smaku. Związkiem chemicznym, który pobudza kubki smakowe odpowiedzialne za odczuwanie smaku umami, jest glutaminian, czyli substancja powszechnie spotykana w produktach wysokobiałkowych.

Należy pamiętać, że większość pokarmów wywołuje mieszane wrażenia smakowe (np. grejpfruty mają smak kwaśno-słodko-gorzki). Najszybciej ulegają pobudzeniu kubki smakowe odpowiedzialne za odczuwanie smaku gorzkiego. Ma to duże znaczenie, ponieważ większość toksycznych substancji jest tego smaku (dzięki temu zostają szybko wykryte w pokarmie).

Powszechnie uważa się, że pewne regiony języka odpowiadają za odbieranie określonych smaków. Odkryto jednak, że kubki smakowe zlokalizowane są nie tylko na języku, lecz także na podniebieniu, górnej części przełyku oraz nagłośni. Co więcej, każdy kubek smakowy może odbierać wszystkie smaki (różny jest tylko próg wrażliwości na nie). Można zatem powiedzieć, że w odczuwaniu pięciu znanych smaków uczestniczy cały język.

? Jaka jest rola adaptacyjna kubków smakowych?



50.3. Kubki smakowe na języku

Narząd węchu

Za narząd zmysłu węchu powszechnie uważa się cały nos, należy jednak pamiętać, że nabłonek węchowy zajmuje niewielką powierzchnię jamy nosowej (ok. 10 cm^2) i zawiera od 7 do 40 milionów komórek węchowych **(50.4.)**. Człowiek potrafi dzięki nim rozpoznać kilka tysięcy różnych substancji zapachowych.

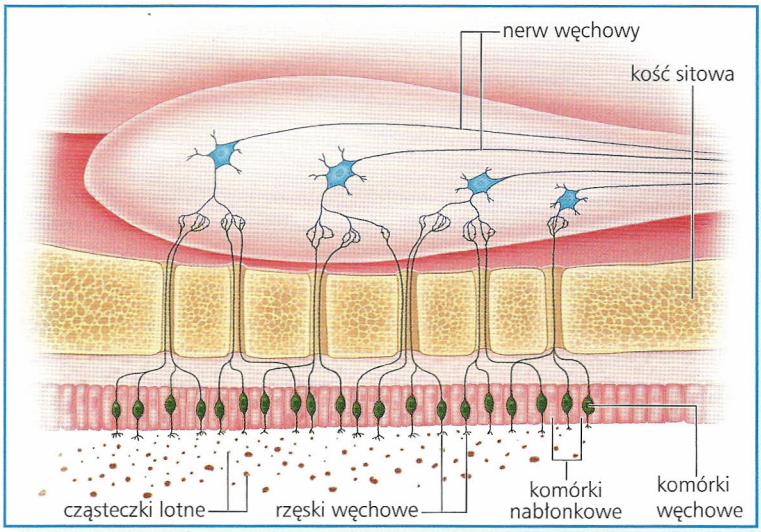
Komórki czuciowe budujące nabłonek węchowy znajdują się w błonie śluzowej górnej i środkowej części jamy nosowej. Ich rzęski stale pokrywa warstwa śluzu, w którym rozpuszczają się substancje zapachowe. Gdy substancje te dotrą do rzęsek, komórka zostaje pobudzona i wysyła sygnał do mózgu.

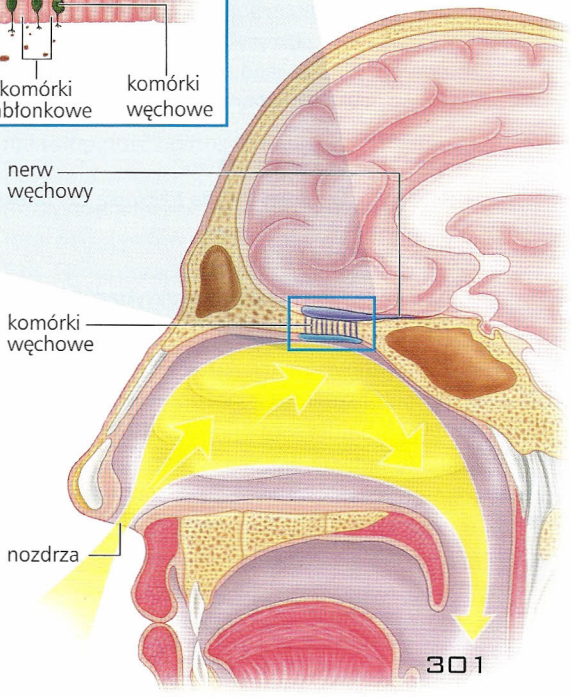
:: Ciekawostka

Nabłonek węchowy zwierząt makrosmatycznych, czyli o bardzo dobrze rozwiniętym węchu (jak np. psy), składa się z około 220 milionów komórek receptorowych!

Rozpoznawanie smaków

Odczuwanie zapachów odgrywa kluczową rolę w odbiorze wrażeń smakowych, ponieważ uzupełnia informacje przekazywane przez kubki smakowe. Dzieje się tak dlatego, że za pomocą nabłonka węchowego człowiek jest w stanie rozpoznać co najmniej kilka tysięcy różnych substancji chemicznych i to w śladowych stężeniach, podczas gdy kubki smakowe rozróżniają zaledwie pięć podstawowych smaków.





50.4. Zmysł węchu

:: Ciekawostka

Znaczenie węchu w rozpoznawaniu smaków bardzo łatwo udowodnić za pomocą prostego eksperymentu. W tym celu należy wybranej osobie zasłonić oczy (np. czarną chustką) i bardzo dokładnie zatkać nos. Następnie należy podać jej do spróbowania zmiksowane i odcedzone warzywa lub owoce (jak marchew, cebula, banan, truskawki, pomidor, czarna jagoda itp.). Jeśli zmysły wzroku i węchu zostały skutecznie wyeliminowane, badana osoba nie będzie w stanie rozpoznać smaków podawanych próbek!

PODSUMOWANIE



- Poza wzrokiem i słuchem za odbiór bodźców odpowiadają również zmysły równowagi, smaku i węchu.
- Narząd równowagi umożliwia określenie położenia i ruchów ciała w przestrzeni, a główne jego ośrodki są zlokalizowane w uchu wewnętrznym.
- Właściwy zmysł równowagi jest zbudowany z trzech kanałów półkolistych oraz przedsionka.
- Przedsionek leży u podstawy kanałów półkolistych i jest wyposażony w niewielkie otolity, zbudowane z kryształków węglanu i fosforanu wapnia.
- W trakcie zmian położenia ciała ruch otolitów po powierzchni nabłonka czuciowego generuje impuls nerwowy.
- Odbieranie bodźców smakowych jest możliwe dzięki kubkom smakowym zebranym w brodawki językowe umieszczone głównie na powierzchni języka.
- Kubki smakowe mogą rozpoznać pięć podstawowych smaków: gorzki, słony, słodki, kwaśny oraz umami.
- Zmysł węchu człowieka jest zlokalizowany w nabłonku węchowym położonym w jamie nosowej.
- Odczuwanie zapachów odgrywa kluczową rolę w odbiorze wrażeń smakowych, ponieważ uzupełnia informacje przekazywane przez kubki smakowe.

ZADANIA



1. Opisz mechanizm działania przedsionka w błędniku błoniastym.
2. Określ, który smak pobudza kubki smakowe w najniższych stężeniach, i wyjaśnij, jakie ten fakt ma znaczenie.
3. Nazwij smak odkryty jako ostatni i wskaż, jaki rodzaj substancji pobudza kubki smakowe odpowiedzialne za jego odczuwanie.
4. Opisz powiązania pomiędzy zmysłem węchu i smaku w odbieraniu bodźców smakowych.

BIBLIOGRAFIA



- Silbernagl S., *Ilustrowana fizjologia człowieka*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2010.

W INTERNECIE



- http://www.is.umk.pl/~duch/Wyklady/Mozg/09-2-sluch.htm

51. Zasady higieny narządu wzroku i słuchu

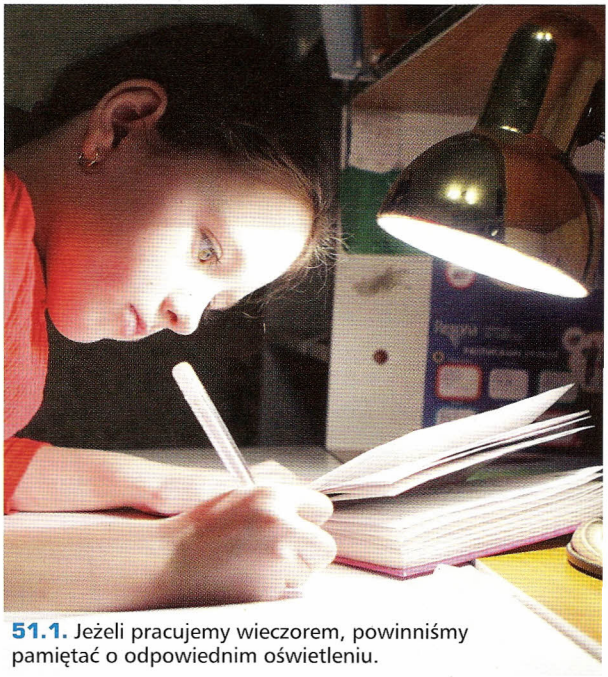
Na jakość działania narządów zmysłów wpływa bardzo wiele czynników, a do najistotniejszych z nich należą uwarunkowania genetyczne oraz wiek. Z czasem zmysły ulegają stępieniu wskutek degeneracji tworzących je komórek receptorowych. Aby zachować je w dobrym stanie do późnej starości, należy na co dzień pamiętać o prostych zasadach **higieny narządów zmysłów**.

Podstawowe zasady higieny oczu i pracy wzrokowej

Higiena oka

Higiena narządu wzroku obejmuje wszelkie sposoby, które zabezpieczają oczy przed szkodliwym wpływem czynników zewnętrznych, mogących je uszkodzić bądź zakłócić ich sprawne funkcjonowanie. Aby zadbać o oczy, należy:

1. Często myć ręce, aby zminimalizować ryzyko przeniesienia drobnoustrojów na powierzchnię gałki ocznej.
2. Niezwłocznie usuwać z oczu ciała obce (np. rzęsy), a jeśli samodzielne ich usunięcie jest niemożliwe – skonsultować się z lekarzem.
3. Chronić je przed kurzem i wiatrem (np. zakładając kask podczas jazdy na motorze), silnym światłem (nosząc okulary przeciwsłoneczne) lub innego typu zagrożeniami (nosząc okulary ochronne podczas niebezpiecznych prac, jak spawanie, prowadzenie doświadczeń chemicznych).



51.1. Jeżeli pracujemy wieczorem, powinniśmy pamiętać o odpowiednim oświetleniu.

Higiena pracy narządu wzroku

Człowiek prowadzi dzienny tryb życia, dlatego typem oświetlenia najodpowiedniejszym dla oczu jest rozproszone światło dzienne. Należy jednak unikać światła o nadmiernym natężeniu. Patrząc przez kilkanaście sekund na słońce, można nieodwracalnie uszkodzić siatkówkę oka i doprowadzić do częściowej lub całkowitej utraty wzroku. Z kolei patrzenie na pokrytą śniegiem powierzchnię w słoneczny dzień powoduje obrzęk spojówek oraz intensywne łzawienie, może jednak również prowadzić do uszkodzenia siatkówki.

Odpowiednie warunki do pracy wzrokowej to przede wszystkim prawidłowe oświetlenie oraz właściwa pozycja podczas czytania i pisania (odległość od obserwowanego przedmiotu powinna wynosić co najmniej 30 cm) **(51.1.)**. Korzystanie przez zbyt długi czas z komputera negatywnie wpływa na ostrość wzroku. Aby temu przeciwdziałać, należy co najmniej raz na dwie godziny robić przerwy w pracy i dokładnie wietrzyć pomieszczenie. Osoby noszące okulary korekcyjne powinny podczas pracy przy komputerze używać szkieł z powłoką antyrefleksyjną, która eliminuje refleksy świetlne powstające na powierzchni okularów i monitora. Zaleca się również, aby w pomieszczeniach, w których pracuje się na komputerach, znajdowało się dużo zieleni (rośliny zapewniają oczom relaks).

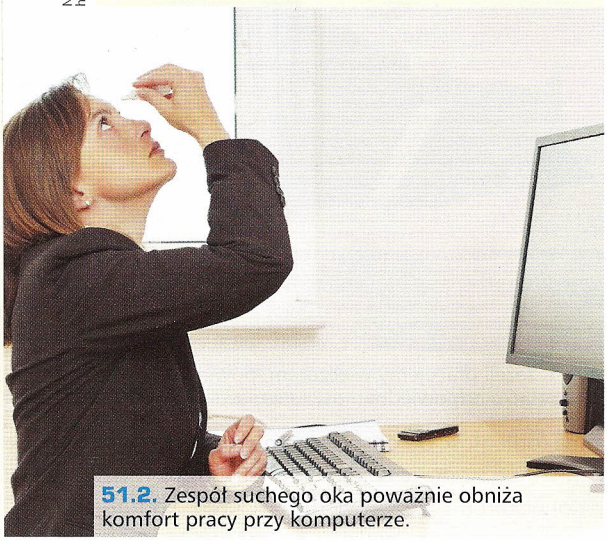
Konsekwencje długiej pracy przed monitorem

Szkodliwość pracy przy komputerze wynika po pierwsze z faktu, że wzrok jest przez długi czas skupiony w jednym punkcie. Prowadzi to do zwiotczenia mięśni poruszających gałką oczną, co z kolei może powodować problemy z akomodacją, a w konsekwencji – z ostrością widzenia.

Wybrane zalecenia SANEPID-u dotyczące warunków pracy przy komputerze

- odległość osoby pracującej przy komputerze od monitora musi wynosić około 70 cm
- minimalna powierzchnia jednego stanowiska komputerowego powinna wynosić 6 m^2
- natężenie światła w pomieszczeniu, gdzie znajdują się komputery, nie może być mniejsze niż 500 luksów (lx)
- monitor nie powinien stać na tle okna
- górny brzeg monitora powinien znajdować się poniżej poziomu oczu
- obraz na ekranie powinien być ostry, kontrastowy i stabilny

Na podst.: M. Buraczewska, *O czym marzą oczy*, http://www.lepszezdrowie.info/oczy.htm.



51.2. Zespół suchego oka poważnie obniża komfort pracy przy komputerze.

Drugim istotnym problemem jest to, że osoby pracujące przy komputerze znacznie rzadziej mrugają. W ten sposób ograniczają nawilżenie rogówki oka za pomocą łez. Może to prowadzić do jej przesuszania, co określa się jako zespół suchego oka **(51.2.)**. Leczenie jego objawów najczęściej polega na stosowaniu preparatów nawilżających (tzw. „sztucznych łez").

W jaki sposób zrelaksować zmęczone oczy?

Oczy zmęczone zbyt długim patrzeniem w monitor można odciążyć i odprężyć, wykonując kilka krótkich ćwiczeń, takich jak:

- otwieranie oczu – należy mocno zacisnąć dłonie, powieki oraz wargi i po kilku sekundach je otworzyć;
- „miękkie spojrzenie" – należy odwrócić wzrok od monitora i skierować go jak najdalej przed siebie, pamiętając o rozluźnieniu oczu i unikając skupiania wzroku na konkretnym obiekcie;
- wodzenie oczami – należy zamknąć oczy i wodzić nimi w różnych kierunkach, a następnie powtórzyć ćwiczenie z otwartymi oczami;
- poszerzanie pola widzenia – należy śledzić wzrokiem wyprostowane palce (w odległości ok. 30 cm od twarzy): najpierw zsunąć je przed sobą, następnie rozsunąć na boki do końca pola widzenia, po czym zsunąć je ponownie;
- „joga oczu" – siedząc w pozycji wyprostowanej, należy patrzeć przed siebie, następnie poruszać oczami: w dół, w górę, na prawo, na lewo i na ukos, a później zataczać nimi koła zgodnie z ruchem wskazówek zegara i w kierunku przeciwnym.

? Sformułuj trzy zalecenia dla osób pracujących przy komputerze, pozwalające uniknąć objawów zespołu suchego oka.

Zasady higieny narządu słuchu

Zdolności słuchowe jednostki są uzależnione przede wszystkim od cech dziedzicznych. Aby zachować te zdolności do późnej starości, należy pamiętać o higienie narządu słuchu. Największe zagrożenie stanowi dla niego hałas, mogący prowadzić nawet do całkowitej głuchoty. Na dużą ilość decybeli narażeni są nie tylko przedstawiciele określonych zawodów, lecz także młodzi ludzie słuchający głośnej muzyki.

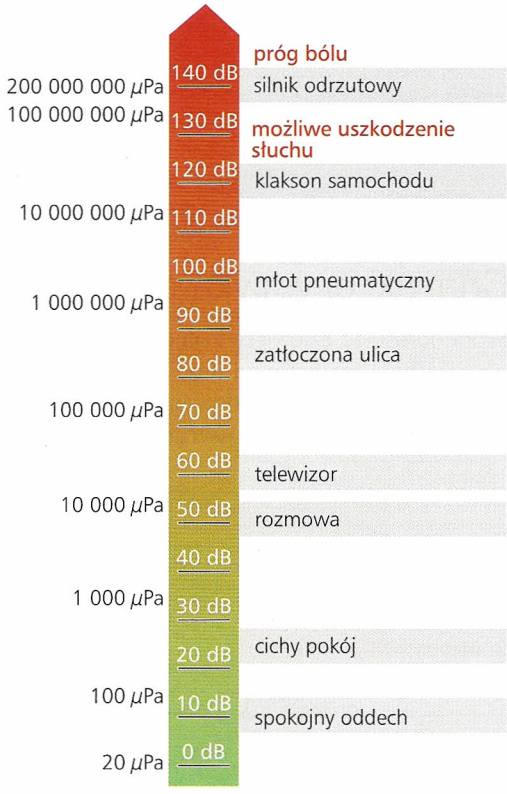
Pierwszym objawem mogącym wskazywać na uszkodzenie słuchu są szumy w uszach. Następnie pojawia się częściowy i czasowy niedosłuch, po którym dochodzi do całkowitego, nieodwracalnego ogłuchnięcia. Utrata słuchu jest spowodowana zużywaniem się komórek receptorowych w narządzie Cortiego. Zmiany te postępują, począwszy od 40. roku życia, jednak brak dbałości o słuch może ten proces znacznie przyspieszyć.

Co robić, aby chronić uszy

Oczywistym sposobem ochrony narządu słuchu jest unikanie **nadmiernego hałasu**, stanowi on bowiem podstawowy czynnik upośledzający czynności tego narządu. Stopień i trwałość uszkodzenia zależą nie tylko od głośności (natężenia) dźwięku, lecz także od jego częstotliwości oraz czasu trwania **(51.3.)**. Nieprawdą jest, że stosowanie słuchawek wewnątrzkanałowych podczas słuchania głośnej muzyki nie powoduje negatywnych konsekwencji. Uszkodzenie słuchu lub czasową głuchotę może również wywołać dźwięk impulsowy (krótki) o dużym natężeniu (np. wybuch petardy, wystrzał z broni palnej).

Osoby, które z powodu wykonywanej pracy są narażone na działanie hałasu, powinny pamiętać o noszeniu odpowiednich nauszników przeciwhałasowych, hełmów lub wkładek dousznych.

Do uszkodzenia słuchu prowadzą także **infekcje bakteryjne** i **wirusowe** górnych dróg oddechowych. Ponieważ gardło łączy się z jamą ucha środkowego poprzez trąbkę Eustachiusza, umożliwia to rozwój stanu zapalnego powodującego znaczne upośledzenie słuchu. W takim wypadku najczęściej stosuje się środki farmakologiczne zwalczające infekcję.



51.3. Natężenie różnych odgłosów (w decybelach)

PODSUMOWANIE

- Higiena narządu wzroku polega na stosowaniu wszelkich metod zabezpieczających oczy przed szkodliwym wpływem czynników zewnętrznych, które mogłyby je uszkodzić bądź zakłócić ich sprawne funkcjonowanie.
- Do podstawowych działań chroniących oczy należą: częste mycie rąk, usuwanie z oczu ciał obcych oraz zabezpieczenie ich przed kurzem, wiatrem i promieniami UV.
- Najlepsze do pracy jest rozproszone światło dzienne.
- Konsekwencjami pracy przy komputerze mogą być osłabienie mięśni poruszających gałką oczną oraz zespół suchego oka.
- Relaks oczu umożliwiają proste ćwiczenia i przerwy w pracy (np. przy komputerze).
- Higiena narządu słuchu polega przede wszystkim na unikaniu hałasu lub izolowaniu się od niego (np. przez stosowanie nauszników przeciwhałasowych).

ZADANIA

1. Scharakteryzuj czynniki szkodzące oczom.
2. Wymień zalecenia dotyczące pracy przy komputerze.
3. Opisz proste ćwiczenia pozwalające na zrelaksowanie oczu w trakcie pracy przy komputerze.
4. Omów zagrożenia, jakie dla narządu słuchu niesie hałas.

W INTERNECIE

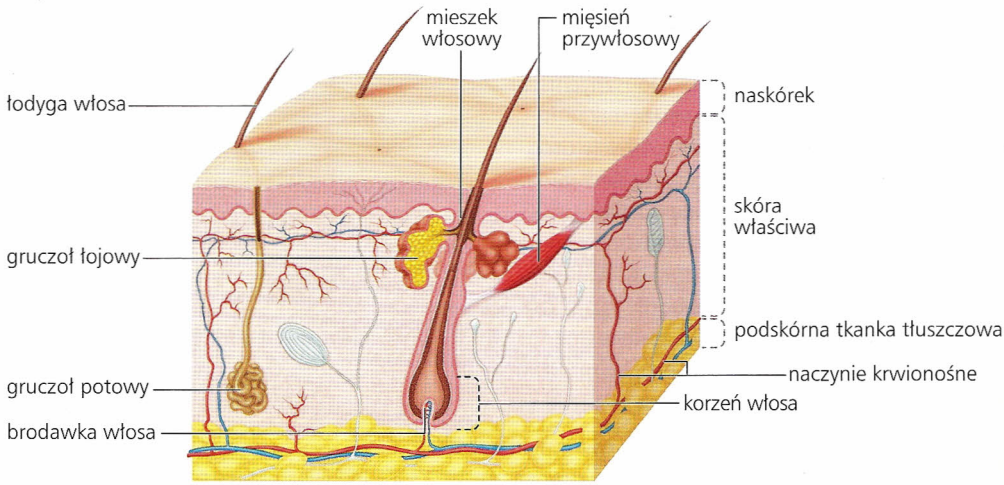
- http://www.nazdrowie.pl/artykul/higiena-uszu

52. Budowa i funkcje skóry

Skóra jest największym narządem człowieka – pokrywa powierzchnię całego ciała. W okolicach naturalnych otworów (oczy, usta, nos, kanał słuchowy, odbyt) przechodzi ona w błonę śluzową układów: oddechowego, pokarmowego, moczowego oraz narządów płciowych. Mimo pozornej prostoty budowy skórę charakteryzuje złożona, wielowarstwowa struktura. Pełni też ona zróżnicowane funkcje.

Charakterystyka skóry

Skóra dorosłego człowieka zajmuje około 2 m^2 powierzchni i ma masę od 3 do 6 kg. Znajduje się w niej doskonale rozbudowana sieć skórnych naczyń krwionośnych, zapewniających wysoką sprawność mechanizmów termoregulacyjnych **(52.1.)**. W porównaniu z innymi ssakami człowiek jest skąpo owłosiony, z wyjątkiem głowy, okolic narządów płciowych oraz pach.



52.1. Struktura fragmentu skóry – największego narządu organizmu

Najważniejsze funkcje skóry

Dzięki wysokiemu stopniu złożoności budowy oraz olbrzymiej powierzchni, w porównaniu z innymi narządami, skóra stanowi narząd niezbędny dla prawidłowego funkcjonowania całego organizmu. Jej najważniejsze funkcje to:

1. **Termoregulacja**. Zachodzi przez skórne naczynia krwionośne, gruczoły potowe oraz owłosienie. Zwężanie i rozszerzanie naczyń skórnych pod wpływem zmian temperatury jest sterowane przez autonomiczną część układu nerwowego i ma charakter odruchowy (niezależny od woli).
2. **Ochrona mechaniczna**. Skóra chroni niżej położone tkanki przed otarciami i uderzeniami. Jest to możliwe dzięki rogowej warstwie naskórka, włóknom kolagenowym i sprężystym skóry właściwej oraz leżącej najniżej warstwie tłuszczowej.
3. **Ochrona chemiczna**. Z wydzieliny gruczołów potowych i łojowych na powierzchni skóry tworzy się warstwa emulsji olejowo-wodnej. Jej zadaniem jest ochrona skóry przed szkodliwym działaniem zewnętrznych czynników chemicznych. Ta warstwa zapobiega też nadmiernemu wysychaniu skóry. Dzięki niskiemu pH ma również działanie przeciwbakteryjne i przeciwgrzybiczne.
4. **Percepcja bodźców**. Skóra zawiera receptory odpowiadające za odbieranie bodźców z ze-

wnątrz: bólu, ucisku, dotyku czy temperatury (niskiej i wysokiej).

5. **Melanogeneza**. Skóra bierze udział w wytwarzaniu barwnika – **melaniny**, który chroni przed szkodliwym wpływem promieniowania UV.
6. **Wchłanianie związków**. Skóra jest zdolna do wybiórczego wchłaniania pewnych grup związków chemicznych, do których należą między innymi witaminy rozpuszczalne w tłuszczach.
7. **Regulacja gospodarki wodno-elektrolitowej**. Dzięki aktywności wydzielniczej gruczołów potowych skóra uczestniczy w regulacji zasobów wody usuwanych z organizmu.
8. **Regulacja gospodarki tłuszczowej**. Skóra stanowi magazyn dla tłuszczu zlokalizowanego w tkance podskórnej.
9. **Produkcja witamin**. Pod wpływem promieniowania UV w skórze z obecnej w niej prowitaminy powstaje witamina D_3.

Szczegółowa budowa skóry

Na właściwą powłokę skórną składają się trzy warstwy:

- naskórek
- skóra właściwa
- tkanka podskórna.

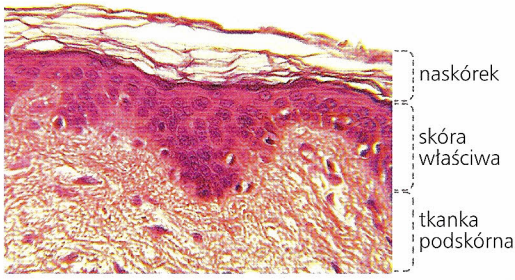
Naskórek

Jest najbardziej zewnętrznie położoną warstwą skóry, zbudowaną z komórek nabłonka wielowarstwowego płaskiego **(52.2.)**. Jest on też odpowiedzialny za tworzenie **gruczołów potowych** i **łojowych**, **włosów** oraz **paznokci**. Komórki naskórka ściśle do siebie przylegają. Nie ma między nimi naczyń krwionośnych i zakończeń nerwowych. Najważniejsza funkcjonalnie w naskórku jest warstwa podstawna. Tworzą ją komórki ściśle przylegające do siebie i do leżącej pod nimi błony podstawnej. Wykazują one zdolności do bardzo częstych podziałów mitotycznych. Zewnętrzna część naskórka stale się złuszcza, ale jego głębsza część pozostaje spoista, dzięki czemu nadaje naskórkowi właściwości bariery mechanicznej.

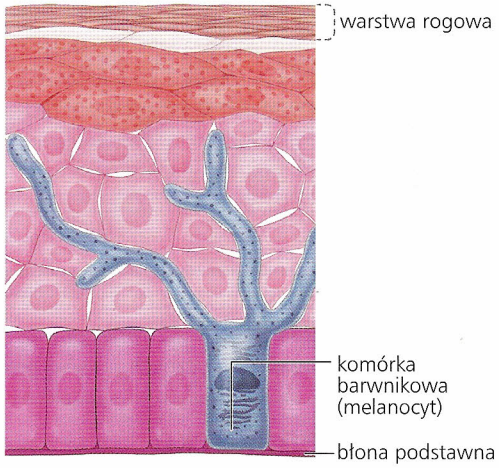
Ważnymi elementami naskórka są tzw. komórki pigmentowe, czyli **melanocyty**, odpowiedzialne za produkcję barwnika – **melaniny** **(53.3.)**. Znajdują się one w warstwie podstawnej naskórka, cebulce włosa oraz tęczówce oka. Wnętrze melanocytów wypełniają liczne pęcherzyki zawierające melaninę. Dzięki nim melanocyty są w stanie chronić głębiej położone warstwy przed szkodliwym wpływem promieniowania UV.

Skóra właściwa

Jest zbudowana z tkanki łącznej, w której przebiegają liczne włosowate naczynia krwionośne, zakończenia nerwowe oraz receptory skórne. Od góry skóra właściwa sąsiaduje z naskórkiem, a od dołu bez wyraźnej granicy przechodzi w tłuszczową tkankę podskórną. Komórki skóry właściwej są rzadko rozmieszczone, dużo jest w niej natomiast substancji międzykomórkowej wypełniającej puste przestrzenie.



52.2. Submikroskopowy obraz skóry

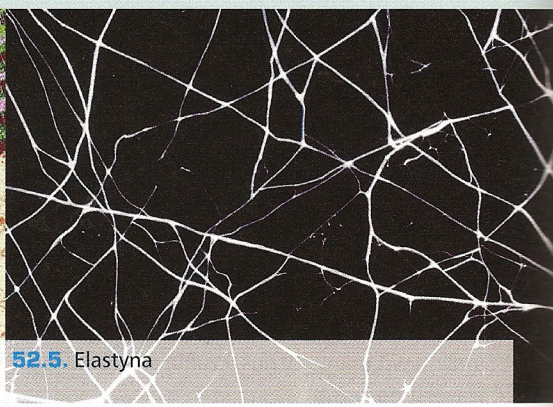


52.3. Melanocyty odpowiadające za produkcję pigmentu skóry – melaniny

? Jakie mogą być konsekwencje niewytwarzania melaniny dla osób genetycznie obciążonych albinizmem?



52.4. Struktura włókien kolagenu uzyskana w transmisyjnym mikroskopie elektronowym (TEM)



52.5. Elastyna

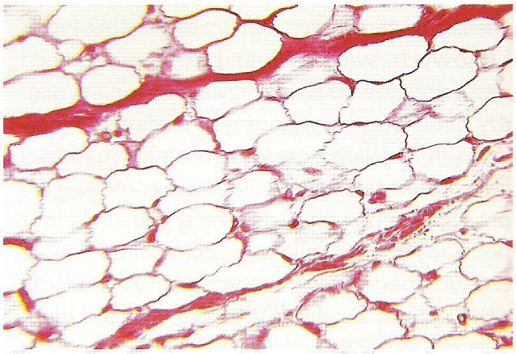
W skład skóry właściwej wchodzą między innymi liczne włókna zbudowane z **kolagenu**. Jest on białkiem najpowszechniej występującym w ludzkim organizmie (30% masy wszystkich białek) **(52.4.)**. Kolagen odpowiada za sprężystość, jędrność oraz wytrzymałość mechaniczną skóry. Oprócz kolagenu w skórze właściwej występują włókna zbudowane z elastyny. Są cieńsze i mniej liczne niż włókna kolagenowe, jednak zdecydowanie bardziej od nich elastyczne. **(52.5.)**.

:: Ciekawostka

Brak witaminy C wywołuje szkorbut, chorobę w dawnych czasach powszechną wśród marynarzy. Niedobór tej witaminy w ich diecie prowadził do powstawania niedojrzałego kolagenu, który nie spełniał swych funkcji. Typowym objawem było wypadanie zębów. Powodowało je rozpuszczanie więzozrostu znajdującego się w zębodole.

Tkanka podskórna

Jest to tkanka gromadząca prawie cały tłuszcz skórny **(52.6.)**. Buduje ją również tkanka łączna tworzona przez sieć włókien kolagenowych ułożonych znacznie luźniej niż w skórze właściwej. W „oczkach" tej sieci znajdują się komórki tłuszczowe. W tkance podskórnej są również umiejscowione naczynia krwionośne i chłonne oraz włókna nerwowe. Tkanka tłuszczowa zapobiega utracie ciepła w niskich temperaturach. Chroni też organizm przed urazami mechanicznymi i gromadzi zapas materiałów energetycznych.



52.6. Tkanka podskórna

Wytwory naskórka

Naskórek tworzy dodatkowe elementy odgrywające dużą rolę w funkcjonowaniu skóry. Pomimo pochodzenia z naskórka są one zakotwiczone w skórze właściwej. Do wytworów naskóka zaliczamy: gruczoły skórne (potowe i łojowe), włosy oraz paznokcie.

Gruczoły skórne

Powierzchnia skóry jest stale nawilżana. Pokrywają ją dwa rodzaje wydzielin – tłuszczowa (czyli łój) oraz wodnista (zwana potem).

Produkcja łoju następuje w **gruczołach łojowych (52.7.)** w wyniku całkowitego rozpadu komórek gruczołu. **Łój** dostaje się do mieszka włosowego, a następnie wypływa na powierzchnię skóry. Tam łączy się z potem i tworzy emulsję pokrywającą skórę warstwą ochronną. Łój jest zbudowany z wolnych kwasów tłuszczowych, cholesterolu oraz związków o charakterze wosków.

Gruczoły potowe zbudowane są z części wydzielniczej i części wyprowadzającej. Jest ich

znacznie więcej niż gruczołów łojowych. Wydzielina gruczołów potowych – **pot** – jest złożona głównie z wody (98%). Cechuje go odczyn kwaśny, zawiera ok. 0,85% NaCl, niewielką ilość mocznika, kwasu moczowego oraz amoniaku. Gruczoły potowe podejmują działanie, gdy konieczne jest schłodzenie organizmu. Gdy temperatura znacznie wzrośnie i wiele gruczołów zaczyna pracę wydzielniczą, pot może nawet przybierać postać kropli.

Specyficzną formą gruczołów potowych są tzw. **gruczoły zapachowe**. Znajdują się w okolicach pach, brodawek sutkowych i w rejonie narządów płciowych. Gruczoły te są nieaktywne w wieku dziecięcym, a ich funkcja nabiera znaczenia dopiero w okresie dojrzewania, gdyż jest sterowana przez bodźce hormonalne (głównie hormony płciowe).

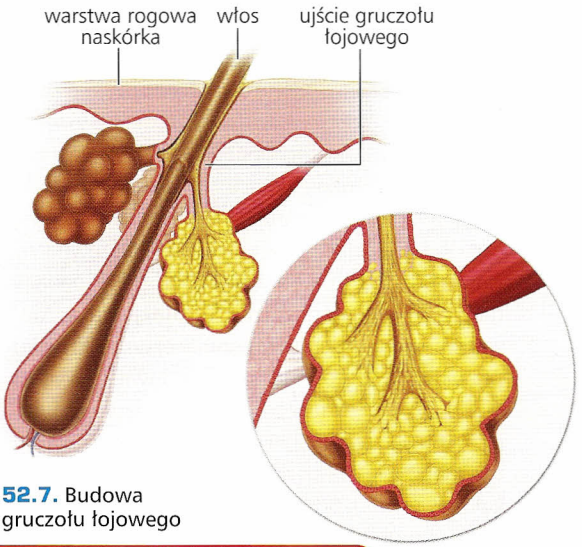
Bardzo przekształconymi gruczołami potowymi są **gruczoły mlekowe**. Są to największe gruczoły skórne. Odpowiadają za produkcję mleka do wykarmienia potomstwa.

Włosy

Owłosienie człowieka w porównaniu do większości zwierząt jest bardzo skąpe (z wyjątkiem niektórych okolic ciała). Ze względu na słabe przewodnictwo cieplne włosy osłaniają przed zimnem i przegrzaniem, a dzięki zawartości melaniny chronią skórę głowy przed promieniowaniem UV. Każdy włos składa się z dwóch odcinków: tkwiącego w skórze korzenia włosa zakończonego rozszerzoną cebulką włosową oraz łodygi włosa wystającej nad powierzchnię skóry **(52.8.)**.

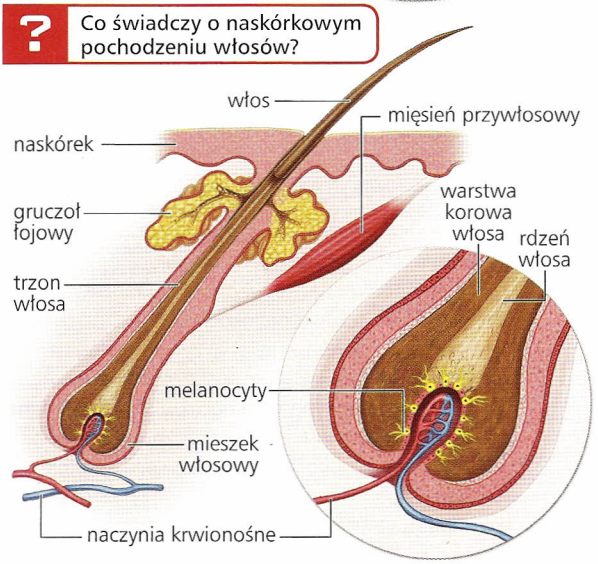
Paznokcie

Są wytworem naskórka mającym postać elastycznej i zrogowaciałej blaszki. Ochraniają opuszkę palca oraz pomagają chwytać i przytrzymywać przedmioty. Podstawowym składnikiem paznokcia jest, podobnie jak w przypadku włosów, białko – keratyna. Najważniejszą część paznokcia, zapewniającą mu stały wzrost, stanowi bogato unerwiona i unaczyniona macierz paznokcia **(52.9.)**.

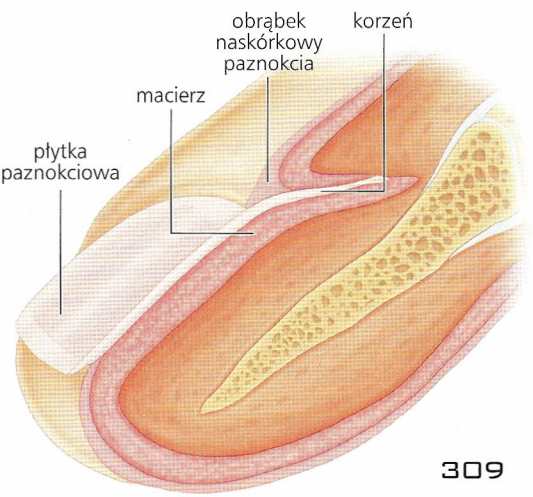


52.7. Budowa gruczołu łojowego

? Co świadczy o naskórkowym pochodzeniu włosów?



52.8. Włosy mają pochodzenie naskórkowe, mimo że znajdują się głęboko w skórze właściwej.



52.9. Budowa paznokcia

Termoregulacyjne funkcje skóry

Ludzki organizm wielokrotnie jest wystawiany na częste, nagłe i niekiedy ekstremalne zmiany temperatury. Jako przedstawiciele zwierząt stałocieplnych w toku ewolucji wykształciliśmy wiele mechanizmów utrzymujących stałą temperaturę ciała w zmieniających się warunkach na zewnątrz. Najważniejszą rolę odgrywa tutaj skóra będąca głównym narządem **termoregulacji ciała**. Niezależnie od temperatury panującej w środowisku prawidłowa temperatura ciała człowieka wynosi około 36,6°C. Nadrzędne znaczenie w regulacji kontroli uwalniania i zatrzymywania ciepła w organizmie ma **ośrodek termoregulacji** zlokalizowany w **podwzgórzu**. Jego rola i mechanizmy kontroli zostały szczegółowo omówione w rozdziale 23. Najwięcej energii cieplnej jako produktu ubocznego przemian metabolicznych wytwarzają mięśnie, natomiast za rozprowadzanie ciepła w organizmie odpowiada krew. Jako tkanka płynna dostarcza ona mięśniom tlenu i substancji odżywczych, jednocześnie odbiera od nich nadmiar ciepła i rozprowadza go po całym ustroju. Ośrodek termoregulacji odgrywa kluczową rolę w kontrolowaniu tempa przepływu krwi w naczyniach włosowatych skóry – pozwala na szybką emisję ciepła i szybkie schłodzenie organizmu. Gdy temperatura panująca na zewnątrz jest niska, podwzgórze zamyka przepływ krwi w naczyniach włosowatych skóry i przepływa ona daleko od powierzchni (skóra staje się blada), a ciepło ma znacznie dłuższą drogę, aby się wydostać na zewnątrz.

W procesie termoregulacji ustroju istotny jest również mechanizm wydzielania potu, prowadzący do lepszego odbioru ciepła z powierzchni skóry w drodze parowania, oraz zmniejszający straty ciepła mechanizm „stawiania" włosów (u człowieka ma on jednak marginalne znaczenie).

PODSUMOWANIE



- Skóra to jeden z najważniejszych narządów ciała. Ma powierzchnię około 2 m^2.
- Skóra pełni funkcje termoregulacyjne, receptorowe, ochronne, wydzielnicze i regulatorowe w gospodarce wodnej i tłuszczowej. Jest zbudowana z trzech warstw: naskórka, skóry właściwej i tkanki podskórnej.
- Naskórek to najbardziej aktywna biologicznie zewnętrzna warstwa skóry, biorąca udział w tworzeniu przydatków skórnych: gruczołów łojowych i potowych, włosów oraz paznokci.
- Szczególnym typem komórek skóry są melanocyty (wytwarzające pigment skórny – melaninę).
- Skóra właściwa to tkanka łączna zbudowana z rzadko rozmieszczonych komórek oraz substancji międzykomórkowej zawierającej białko kolagen.
- Tkanka podskórna to przede wszystkim tkanka tłuszczowa. Zapewnia ona izolację termiczną, zapasową oraz ochronę mechaniczną.

ZADANIA



1. Wymień i opisz ochronne funkcje skóry.
2. Scharakteryzuj funkcję melanocytów.
3. Przedstaw strukturę i funkcje wytworów naskórka.
4. Wyjaśnij termoregulacyjne funkcje skóry.

BIBLIOGRAFIA



- Peters B., *Kosmetyka*, Wydawnictwo Rea, Warszawa 2007.
- Noszczyk M., *Kosmetologia pielęgnacyjna i lekarska*, PZWL, Warszawa 2010.

W INTERNECIE



- http://www.naszaskora.com.pl/
- http://www.kolagenpolska.pl/skora.html
- http://skoraczlowieka.info.pl/

53. Choroby skóry i profilaktyka

Skóra osłania organizm przed drobnoustrojami nieustannie poszukującymi sposobów na wniknięcie do jego wnętrza i rozwinięcie tam **procesu chorobowego**. O ile nie zostanie uszkodzona mechanicznie, dla patogenów stanowi barierę trudną do sforsowania. W wielu jednak sytuacjach bakterie, wirusy, grzyby czy pasożyty wykorzystują zaburzenie fizjologicznych funkcji skóry lub wektory (np. komary), by skutecznie przełamać jej bariery ochronne. Poza czynnikami pochodzenia zewnętrznego **funkcje skóry** mogą zostać poważnie naruszone przez choroby niezakaźne i na skutek procesów fizjologicznych w ustroju (procesy nowotworowe, odczyny alergiczne, trądzik młodzieńczy).

Trądzik

Trądzik jest to najczęściej spotykana choroba skóry dotykająca praktycznie 100% populacji. Najczęściej występuje w okresie dojrzewania, jednak czasem może być obecny również po 30. roku życia. Typowym dla trądziku objawem są tzw. zaskórniki. Powstają one na skutek zablokowania ujścia gruczołów łojowych. W sąsiedztwie zaskórników może się następnie rozwinąć proces zapalny. Najczęstszymi czynnikami sprzyjającymi powstawaniu trądziku są:

- nadmierna produkcja męskich hormonów płciowych (w okresie dojrzewania)
- nadmierne wydzielanie łoju (łojotok)
- infekcje wywołane przez beztlenowe bakterie.

Zmiany trądzikowe najczęściej pojawiają się na twarzy, plecach, owłosionej skórze głowy oraz klatce piersiowej. Leczenie trądziku polega na stosowaniu preparatów (np. kremów), których celem jest zlikwidowanie zaskórników i zmian zapalnych. W stanach większego nasilenia trądziku stosuje się podawane doustnie środki (np. antybiotyki, hormony, preparaty witaminowe, cynk). Profilaktycznie stosuje się kosmetyki do cery problematycznej, wskazane jest również unikanie ostrych przypraw, alkoholu i nadmiernego opalania.

? Omów warunki sprzyjające zapaleniu mieszków włosowych po depilacji.



53.1. Zapalenie mieszków włosowych to częsta przypadłość po zabiegach depilacji

Choroby bakteryjne

To jedne z najbardziej powszechnych schorzeń skóry występujące u ludzi w różnym wieku. Najczęstszym objawem bakteryjnego zakażenia skóry jest stan zapalny o charakterze ropnym. Należy pamiętać, że nie wszystkie bakterie są dla nas szkodliwe. Niektóre z nich żyją na powierzchni naszej skóry stale, stanowią tzw. **naturalną florę skóry**. U zdrowych osób bakterie z tej grupy nie są w stanie wywołać żadnych objawów chorobowych. Należy jednak pamiętać, że każdy z tych drobnoustrojów może się przyczynić do **zakażeń oportunistycznych**, czyli takich, które pojawiają się u osób z obniżoną odpornością (np. u cierpiących na AIDS lub pacjentów po transplantacjach narządów przyjmujących leki immunosupresyjne).

Aby jednak mogło dojść do rozwoju zakażenia, samej obecności patogennych bakterii muszą towarzyszyć określone okoliczności. Należą do nich:

- uszkodzenia naskórka
- podwyższenie pH skóry
- spadek ogólnej odporności organizmu
- współistniejące choroby (cukrzyca, przewlekła niewydolność nerek).

Profilaktyka zakażeń bakteryjnych skóry polega przede wszystkim na przestrzeganiu podstawowych zasad higieny osobistej.

Jedną z najczęstszych chorób bakteryjnych skóry jest **ostre zapalenie mieszków włosowych**. Prawie zawsze powstaje na skutek infekcji wywołanej przez bakterie wnikające z powierzchni skóry przez ujście mieszka włosowego. Szczególne podatne na rozwój zapalenia mieszków włosowych są plecy, kark oraz okolice poddawane zabiegom depilacji **(53.1.)**.

Choroby wirusowe

Choroby wywoływane przez wirusy należą do jednych z najbardziej uciążliwych dolegliwości skórnych człowieka. Można ich uniknąć, jeżeli ograniczy się do minimum kontakty z zakażonymi osobami.

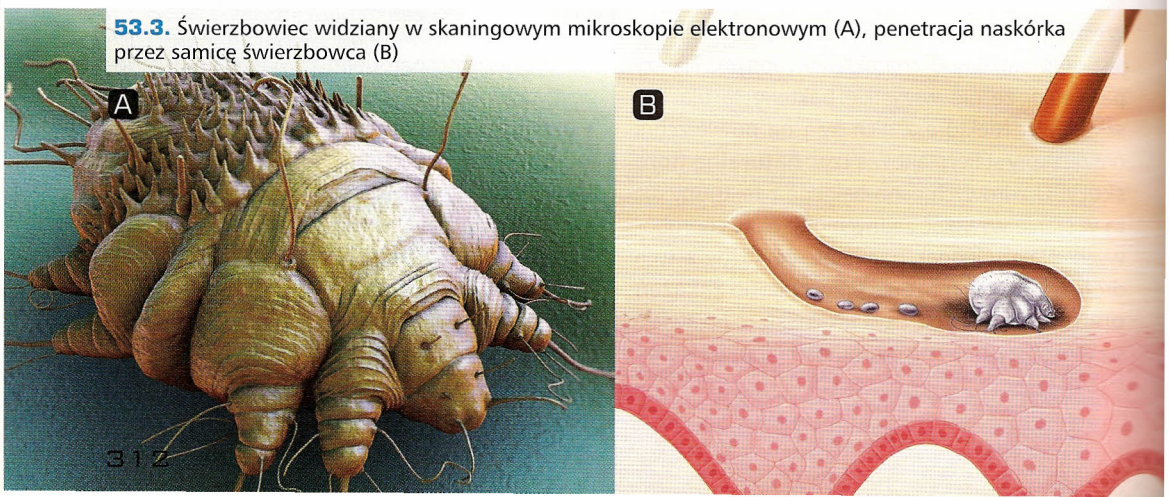
Opryszczka zwykła to choroba wywoływana przez wirus opryszczki zwykłej (HSV – *Herpes Simplex Virus*) **(53.2.)**. Wirusy te występują praktycznie wszędzie i wnikają do organizmu przez drobne uszkodzenia skóry i błon śluzowych. Pierwotna infekcja przebiega zawsze niepostrzeżenie. W jej trakcie atakowi wirusów ulegają komórki nabłonkowe, a następnie – leżące w ich sąsiedztwie komórki nerwowe. Po zainfekowaniu neuronów wirusy przechodzą w fazę uśpienia. Po pewnym czasie, na skutek działania różnych czynników, wirusy stają się aktywne. Wydostają się z neuronów i atakują sąsiadujące z nimi komórki nabłonkowe. Typowymi objawami są świąd oraz uczucie napięcia skóry w miejscu pojawienia się drobnych pęcherzyków wypełnionych początkowo treścią surowiczą, potem – ropną. W odróżnieniu od wielu innych infekcji wirusowych zakażenie HSV nie wywołuje dożywotniej odporności, a zatem ma tendencję do nawrotów.



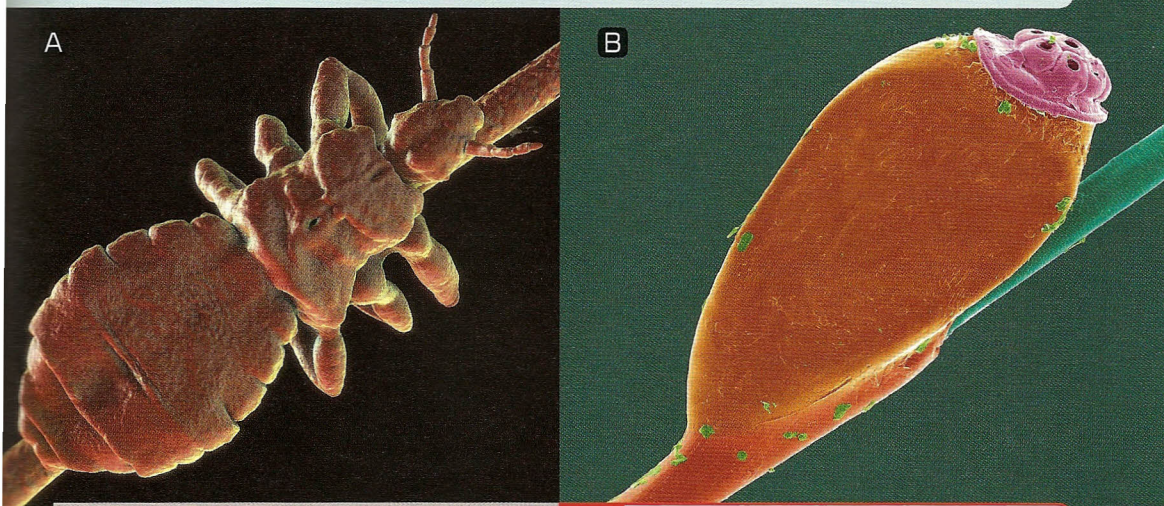
53.2. Najbardziej typową lokalizacją opryszczki jest granica czerwieni wargowej.

Choroby pasożytnicze

Powierzchnia skóry człowieka jest doskonałym miejscem, na którym mogą się rozwijać **pasożyty**. Pasożyt przytwierdzony do ciała żywiciela żywi się jego kosztem, ale może też roznosić różne choroby. Podobnie jak w przypadku chorób bakteryjnych najlepszym sposobem uniknięcia zakażenia jest przestrzeganie zasad higieny osobistej. Do najczęstszych chorób pasożytniczych należą **świerzb** oraz **wszawica**.



53.3. Świerzbowiec widziany w skaningowym mikroskopie elektronowym (A), penetracja naskórka przez samicę świerzbowca (B)



53.4. Wesz ludzka (A), przymocowane do włosa złożone jaja (B)

? Opisz mechanizm przenoszenia się świerzbowca z człowieka na człowieka.

Świerzb

Jest to ciężka choroba skóry powodowana przez niewielkiego pajęczaka należącego do **roztoczy**. Zakażenie następuje najczęściej w wyniku bezpośredniego kontaktu z osobą zakażoną. Samica świerzbowca **(53.3.)** po wydrążeniu kanału w warstwie rogowej naskórka składa na jego końcu kilka jaj. W krótkim czasie wylęgają się z nich larwy, które po następnych 3 tygodniach przekształcają się w dojrzałe osobniki. Pasożyty te są w stanie przeżyć do 72 godzin poza organizmem człowieka, a zatem przedmioty codziennego użytku stają się potencjalnym źródłem zakażenia. Typowymi objawami są uczucie swędzenia skóry, widoczne są również różowe ślady (korytarze), stopniowo wypełniające się szaroczarnym kałem roztoczy.

Wszawica

Jest to choroba skóry wywołana przez pasożytnicze owady. Żywią się one naskórkiem oraz krwią, ale mogą także przenosić wiele groźnych chorób zakaźnych: **dur brzuszny**, **dur** (inaczej **tyfus**) **plamisty** oraz **dżumę**. Wyróżniamy dwa gatunki tego pasożyta. **Wesz łonowa** pasożytuje głównie w okolicy łonowej, w pachwinach oraz w pachach. Niekiedy może występować także na brwiach i rzęsach. **Wesz ludzka (53.4.)** jest większa od łonowej. Pasożyt ten najczęściej atakuje okolicę skroniową i potyliczną owłosionej skóry głowy. Może też żyć w odzieży oraz pościeli, wykorzystując człowieka jedynie jako źródło pokarmu. W wyniku uporczywego drapania zaatakowanych miejsc powstają dalsze uszkodzenia naskórka, który często ulega wtórnym nadkażeniom bakteryjnym.

Choroby nowotworowe skóry

Czerniak złośliwy

Nowotwory skóry należą do chorób nowotworowych najczęściej występujących u człowieka. Najgroźniejszy z nich – **czerniak złośliwy** – atakuje skórę i błony śluzowe. Wywodzi się z **melanocytów**, czyli komórek pigmentowych skóry. Najczęściej pojawia się w obrębie istniejących **znamion barwnikowych**. Charakterystyczną jego cechą są bardzo wczesne przerzuty. Najważniejszym czynnikiem sprzyjającym rozwojowi czerniaka złośliwego jest nadmierna ekspozycja na promieniowanie UV, a zwłaszcza promienie UVA stanowiące blisko 95% promieniowania ultrafioletowego. Dociera ono do skóry właściwej i prowadzi do jej uszkodzenia. Efektem narażenia na działanie promieniowania ultrafioletowego (np. w wyniku opalania) jest przyspieszone starzenie się skóry, a także uszkodzenia DNA jej komórek, co może zapoczątkować proces nowotworowy. Negatywne skutki można zniwelować, stosując kremy do opalania z odpowiednim filtrem ochronnym.

Do innych czynników zwiększających ryzyko wystąpienia czerniaka złośliwego zaliczamy:
- czynniki genetyczne (u ok. 10% chorych)
- rakotwórcze działanie związków chemicznych obecnych w zanieczyszczonym środowisku
- jasną karnację skóry i wiążącą się z tym dużą podatnością na oparzenia słoneczne
- mnogość łagodnych znamion na skórze (piegi, pieprzyki).

Bardzo ważnym elementem profilaktyki tego nowotworu jest kontrola przez dermatologa zmian skórnych, zwłaszcza gdy zaobserwuje się zachodzące w nich zmiany (np. kształtu lub rozmiaru). Kontrola ta jest tym ważniejsza, że rokowanie w tej chorobie w bardzo dużym stopniu zależy od etapu, na jakim podejmie się leczenie. Bardzo ważne w leczeniu czerniaka złośliwego jest zatem jego wczesne wykrycie. Wczesne zmiany, które nie opanowały jeszcze zbytnio leżących głęboko warstw skóry, dają duże nadzieje na całkowite wyleczenie (remisję). Przy zmianach rozległych rokowanie jest niekorzystne dla pacjenta.

W terapii stosuje się operacyjne wycięcie zmienionych nowotworowo tkanek z dużym marginesem tkanki zdrowej zarówno naskórka, jak i głębszych warstw skóry. Po dokonaniu oceny histopatologicznej stosuje się chemioterapię lub radioterapię oraz wycięcie węzła chłonnego w celu wyeliminowania pozostających w nim komórek rakowych.

PODSUMOWANIE



- Skóra stanowi pierwszą barierę ochronną organizmu, zatem często cierpi jako pierwsza w zetknięciu z patogenami.
- Trądzik to powszechna choroba skóry występująca w okresie dojrzewania.
- Najpowszechniej występującą chorobą bakteryjną skóry jest zapalenie mieszków włosowych.
- Chorobą wirusową, która manifestuje się na powierzchni skóry jest opryszczka.
- Do chorób pasożytniczych dotykających skórę należą świerzb oraz wszawica.
- Spośród chorób nowotworowych skóry największym zagrożeniem jest czerniak złośliwy.

ZADANIA



1. Co nazywamy zakażeniem oportunistycznym?
2. Scharakteryzuj bakteryjne choroby skóry.
3. Omów gatunki wszy pasożytujące na człowieku.
4. Podaj objawy diagnostyczne czerniaka złośliwego.

BIBLIOGRAFIA



- Błaszczyk H., Zalewska-Janowska A., *Choroby skóry*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2008.
- Youngson R., *Jak radzić sobie z chorobami skórnymi*, Feeria, 2007.



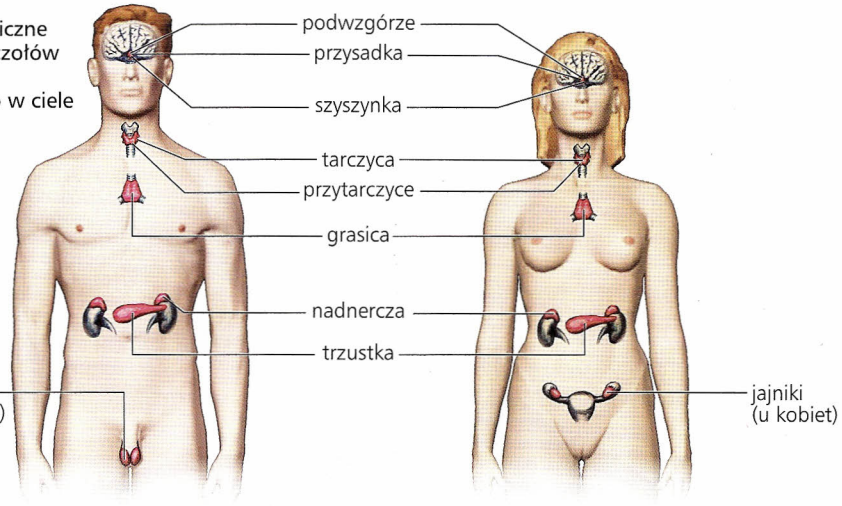
54. Budowa układu hormonalnego

Hormony to substancje chemiczne, które przenoszą informację do komórek i wywierają na nie określony wpływ, ponieważ dostosowują ich działanie do potrzeb organizmu. Większość hormonów krąży stale we krwi i ma dostęp do niemal wszystkich komórek ustroju, jednak każdy hormon działa tylko na wąską grupę nazywaną komórkami docelowymi. Takie komórki muszą być wyposażone w odpowiedni **receptor** wiążący hormon.

Gruczoły dokrewne

Stanowią podstawowe skupiska tkanki wydzielniczej układu hormonalnego. Nie mają przewodów (kanałów) wyprowadzających, oddają bowiem swoje produkty bezpośrednio do krwi. Substancje wydzielane przez gruczoły dokrewne noszą nazwę **hormonów** (gr. *hormao* = pobudzam). Pełnią one w organizmie kluczowe funkcje regulacyjne, ponieważ przyczyniają się do utrzymania stanu homeostazy (m.in. stężenia glukozy we krwi czy ciśnienia osmotycznego płynów tkankowych). Od hormonów zależą również wzrost i rozwój całego organizmu – zarówno fizyczny, jak i umysłowy. Nauka zajmująca się badaniem hormonów i poznawaniem mechanizmów ich działania to **endokrynologia**.

Pod względem anatomicznym **gruczoły dokrewne** nie tworzą jednego spójnego układu. Pozostają jednak w łączności dzięki krwi i dlatego te skupiska komórek wydzielniczych można nazywać układem. U większości kręgowców budowa układu hormonalnego jest zbliżona. W jego skład wchodzą takie gruczoły jak: **podwzgórze**, **przysadka mózgowa**, **szyszynka**, **grasica**, **tarczyca**, **przytarczyce**, **wyspy Langerhansa trzustki**, **kora** i **rdzeń nadnerczy**, **jądra** oraz **jajniki** (54.1.).



54.1. Anatomiczne położenie gruczołów wydzielania wewnętrznego w ciele człowieka

Charakterystyka i mechanizm działania hormonów

Gdy mówimy o działaniu hormonów, zazwyczaj wyobrażamy je sobie jako związki chemiczne działające w minimalnych stężeniach i powodujące przyspieszenie pewnych procesów biologicznych w komórkach. Tak w istocie pracuje większość znanych hormonów, jednak czasami potrzebne jest ich działanie odwrotne, „wyciszające" pewne procesy biochemiczne. Należy również pamiętać o tym, że hormony (podobnie jak enzymy) nie pełnią funkcji substratów w procesach biochemicznych tkanek, na które oddziałują, a jedynie modyfikują ich przebieg. Pod względem działania układu hormonalnego widać jego duże podobieństwo do układu nerwowego. Różnica polega na tym, że ten drugi reaguje znacznie szybciej, jednak efekty działania hormonów utrzymują się zazwyczaj o wiele dłużej.

Podwzgórze i przysadka mózgowa

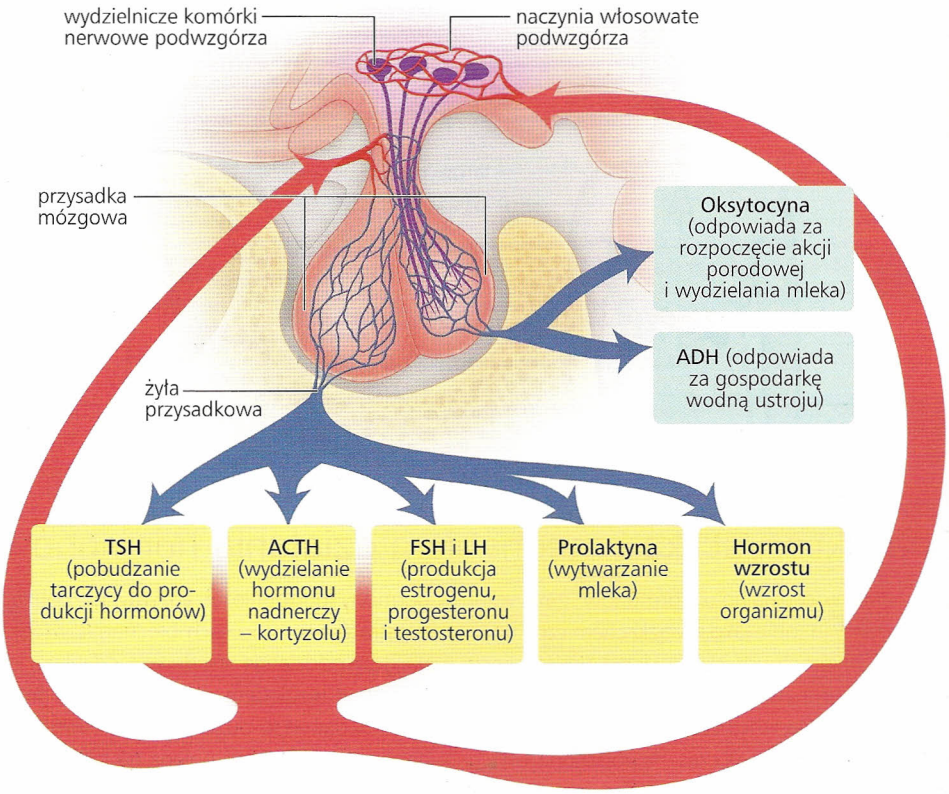
Przysadka mózgowa jest nadrzędnym gruczołem dokrewnym. Wydziela ona szereg hormonów wpływających niemal na każdą komórkę i regulujących wszystkie procesy fizjologiczne ustroju. Choć przysadka mózgowa odgrywa taką ważną rolę, to jednak pozostaje pod wpływem substancji produkowanych przez **podwzgórze**, które jest łącznikiem pomiędzy układem nerwowym i dokrewnym **(54.2.)**. To w podwzgórzu następuje integracja bodźców napływających z receptorów całego ciała (narządów zmysłów oraz receptorów wewnętrznych).

W zależności od potrzeb organizmu podwzgórze produkuje dwa rodzaje hormonów: uwalniające (liberyny), które pobudzają aktywność wydzielniczą przysadki, a także hamujące, które zmniejszają wydzielniczą aktywność przysadki. Przykładami hormonów uwalniających mogą być gonadoliberyna, stymulująca przysadkę do wydzielania gonadotropin (LH i FSH), oraz somatoliberyna wpływająca na produkcję i wydzielanie hormonu wzrostu przez przysadkę.

:: Ciekawostka

Czasowa bezpłodność spowodowana karmieniem piersią jako naturalna metoda zapobiegania ponownemu zajściu w ciążę tuż po urodzeniu dziecka nosi nazwę metody LAM (ang. *lactational amenorrhea method* = metoda laktacyjnego braku miesiączki). Zaobserwowano, że stężenie prolaktyny we krwi najbardziej rośnie w czasie karmienia, a po karmieniu zaczyna stopniowo spadać. Zatem metoda LAM będzie skuteczna jedynie wówczas, gdy czas pojedynczego karmienia będzie długi oraz gdy kobieta bardzo często karmi w ciągu doby. Nie jest to więc metoda w 100% skuteczna.

Należy pamiętać, że każdej liberynie odpowiada działający antagonistycznie hormon hamujący. Najważniejszym hormonem z tej grupy jest somatostatyna powstrzymująca wydzielanie hormonu wzrostu przez przysadkę mózgową.



54.2. Działanie przysadki mózgowej

Hormony przysadki mózgowej

Hormon wzrostu (somatotropina)

Jest to hormon białkowy, wpływający stymulująco na wzrost całego organizmu. Jego produkcję pobudza wysiłek fizyczny, stres oraz rodzaj spożywanego pokarmu. Wydzielanie hormonu wzrostu hamuje natomiast somatostatyna, wydzielana przez podwzgórze.

Choroby związane z zaburzeniami produkcji hormonu wzrostu

Gigantyzm jest następstwem nadmiernego wydzielania hormonu we wczesnym dzieciństwie lub okresie młodzieńczym, a więc jeszcze przed zakończeniem procesu wzrastania kośćca. Objawia się rozmiarami ciała znacznie przekraczającymi wzrost rówieśników.

Akromegalia to następstwo nadmiernego wydzielania hormonu wzrostu u osób dorosłych. Objawia się rozrostem tkanek stóp, dłoni, żuchwy, nosa, powiększeniem narządów wewnętrznych i deformacjami stawów.

Karłowatość przysadkowa to choroba powodująca niski wzrost. Wywołuje ją brak wytwarzania hormonu wzrostu.

Prolaktyna

Jest hormonem białkowym. Powoduje rozrost gruczołów sutkowych w czasie ciąży oraz produkcję mleka w gruczołach mlecznych. Zarówno w ciąży, jak i po porodzie (gdy kobieta karmi piersią) prolaktyna działa na zasadzie ujemnego sprzężenia zwrotnego na przysadkę, hamując wydzielanie **hormonu luteinizującego** (**LH**) i **folikulotropowego** (**FSH**). Prowadzi to do czasowego zatrzymania menstruacji i owulacji.

Tyreotropina (TSH)

Hormon ten należy (razem z ACTH, LH i FSH) do tzw. **hormonów tropowych**, które stymulują działanie innych gruczołów. **Tyreotropina** stymuluje tarczycę do syntezy i wydzielania specyficznych dla niej hormonów (**tyroksyny** i **trójjodotyroniny**).

Adrenokortykotropina (ACTH)

Ten hormon przysadki pobudza korę nadnerczy do wydzielania **kortyzolu** (zwanego hormonem stresu) oraz **aldosteronu**. ACTH jest wydzielany przez przedni płat przysadki w czasie reakcji stresowej.

Hormon luteinizujący (LH)

U kobiet szczytowe stężenie hormonu luteinizującego we krwi objawia się tuż przed zakończeniem fazy dojrzewania pęcherzyka Graafa. Hormon luteinizujący w wysokim stężeniu jest bezpośrednią przyczyną pęknięcia tego pęcherzyka, czyli **owulacji**. Gdy dojdzie do uwolnienia komórki jajowej do jajowodu, wówczas LH powoduje **luteinizację**, czyli przekształcenie pozostałości pęcherzyka Graafa w **ciałko żółte** produkujące progesteron i estrogeny. U mężczyzn hormon LH stymuluje syntezę i wydzielanie testosteronu.

Hormon folikulotropowy (FSH)

FSH u kobiet pobudza dojrzewanie pęcherzyków jajnikowych oraz zwiększa wydzielanie estradiolu przez jajniki. U mężczyzn natomiast odpowiada za proces spermatogenezy.

Oksytocyna

Ten hormon jest peptydem. Najważniejsze działanie oksytocyny to stymulacja skurczu mięśni gładkich macicy w fazie porodowej i poporodowej. Oksytocyna stymuluje też wypływanie mleka z gruczołów mlecznych.

Wazopresyna (hormon antydiuretyczny, ADH)

Główną funkcją tego hormonu w organizmie jest **regulacja wydzielania wody**. Działanie ADH najbardziej uwidacznia się w nerkach. Zwiększa wchłanianie wody i tym samym wpływa na produkcję mniejszej ilości zagęszczonego moczu.

:: Ciekawostka

U kobiet pojawia się rzadko spotykane w układzie hormonalnym zjawisko dodatniego sprzężenia zwrotnego objawiające się zwiększonym wydzielaniem hormonu LH wskutek zwiększającego się stężenia estrogenów, co ma miejsce w fazie przedowulacyjnej.

Tarczyca

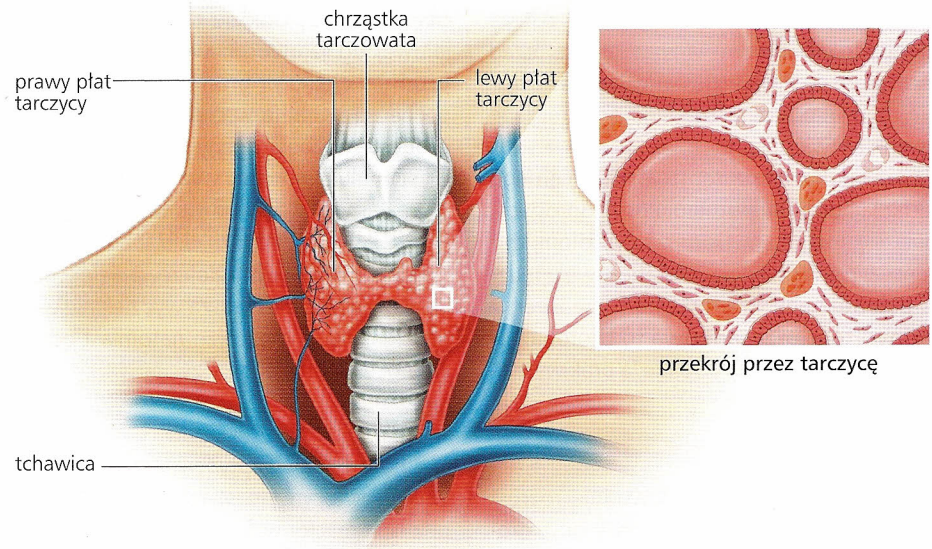
Tarczyca jest niewielkim gruczołem wydzielania wewnętrznego **(54.3.)**. Składa się z dwóch symetrycznych płatów położonych w sąsiedztwie tchawicy. Komórki tarczycy wychwytują z krwi **jod**, wykorzystywany następnie do produkcji hormonów tarczycy.

Tyroksyna i trójjodotyronina

Tyroksyna (**T4**) z czterema atomami jodu i **trójjodotyronina** (**T3**) z trzema atomami tego pierwiastka to główne hormony wydzielane przez tarczycę. Funkcja tyroksyny i trójjodotyroniny polega na znacznym przyspieszeniu metabolizmu, któremu towarzyszy produkcja dużej ilości ciepła.

Kalcytonina

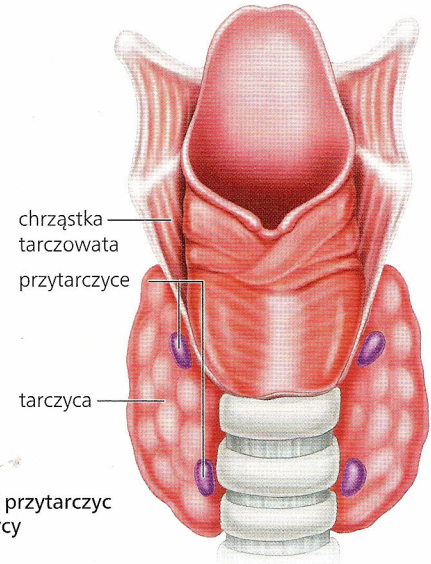
Jest to trzeci hormon produkowany przez tarczycę, odgrywający ważną rolę w regulacji **gospodarki wapniowej** ustroju (por. rozdz. 57.).



54.3. Położenie i schemat budowy tarczycy oraz pęcherzyków wydzielających hormony

Przytarczyce

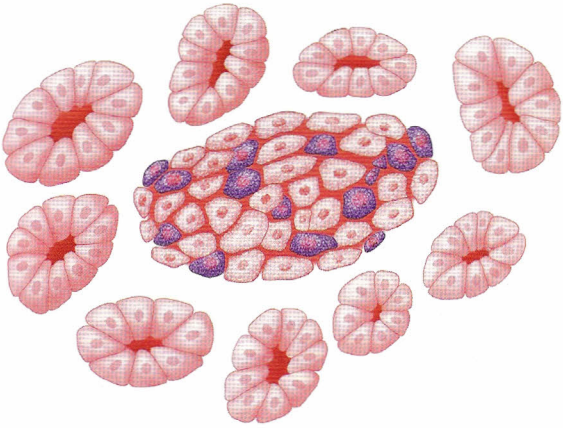
Są to dwie pary niewielkich gruczołów zlokalizowanych na tylnej ścianie tarczycy **(54.4.)**. Razem z tarczycą odgrywają kluczową rolę w sterowaniu gospodarką wapniową ustroju. Utrzymanie stężenia wapnia na stałym poziomie jest niezwykle istotne, gdyż poza budowaniem kości jest on także niezbędny do prawidłowej pracy komórek (głównie mięśniowych i nerwowych). Hormonem wydzielanym przez przytarczyce jest **parathormon** (por. rozdz. 57.).



54.4. Położenie czterech części przytarczyc na tylnej ścianie gruczołu tarczycy

Trzustka

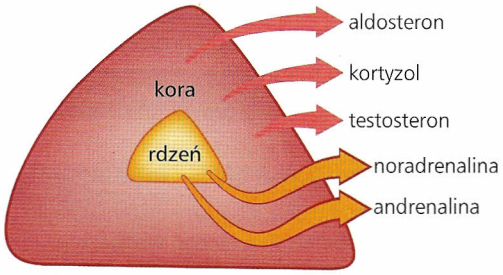
Trzustka została opisana szczegółowo w rozdziale poświęconym układowi pokarmowemu (por. rozdz. 30.). Jest jednak również ważnym gruczołem wydzielania wewnętrznego, a czynności wewnątrzwydzielnicze pełnią w niej grupy wyspecjalizowanych komórek skupionych w tzw. **wyspach Langerhansa** (54.5.). Pierwsze to komórki α, które produkują **glukagon** uwalniający do krwi glukozę zmagazynowaną w glikogenie. Drugi typ komórek – komórki β – wytwarzają **insulinę** (działającą antagonistycznie do glukagonu), obniżającą poziom glukozy we krwi w wyniku wbudowania jej do glikogenu.



54.5. Struktura wysp Langerhansa w trzustce

Nadnercza

Nadnercza to gruczoły, które leżą na szczytowej części każdej z nerek. Są zbudowane z części **korowej** i **rdzeniowej** (54.6.). Położona na zewnątrz część korowa produkuje głównie **aldosteron**. Odpowiada on za zwrotne wchłanianie sodu w kanalikach nerkowych i wydalanie tą drogą jonów potasu. **Kortyzol** natomiast, nazywany hormonem stresu, jest odpowiedzialny za rozpad białek, reakcje przeciwzapalne oraz hamowanie reakcji odpornościowych. Rdzeniowa część nadnerczy steruje syntezą **adrenaliny** i **noradrenaliny**. Te hormony mają wpływ na rozszerzenie oskrzeli i źrenic, zwiększenie ciśnienia tętniczego krwi w wyniku skurczu obwodowych naczyń krwionośnych oraz na podniesienie poziomu cukru we krwi po intensyfikacji rozpadu glikogenu w wątrobie (glikogenolizy). Oba hormony zwiększają również pojemność minutową serca oraz nieznacznie rozszerzają naczynia wieńcowe. Dzięki temu mięsień sercowy jest lepiej zaopatrzony w tlen.



54.6. Schemat przekroju przez gruczoł nadnerczowy

Szyszynka

Jest to niewielki gruczoł dokrewny zlokalizowany w międzymózgowiu. Budujące **szyszynkę** komórki wytwarzają hormon – **melatoninę**, której głównym zadaniem jest regulacja rytmu okołodobowego organizmu (faz snu i czuwania). Ilość wydzielanego hormonu jest ściśle powiązana z natężeniem światła docierającego do siatkówki oka. Intensywne oświetlenie w ciągu dnia skutkuje zmniejszeniem ilości melatoniny. Natomiast nocą, gdy ilość światła docierająca do siatkówki jest niewielka, szyszynka wydziela duże ilości hormonu, co umożliwia organizmowi skuteczne zasypianie. Drugim zadaniem melatoniny jest hamowanie wydzielania przez przysadkę mózgową hormonów gonadotropowych, co zapobiega przedwczesnemu dojrzewaniu płciowemu u dzieci.

Grasica

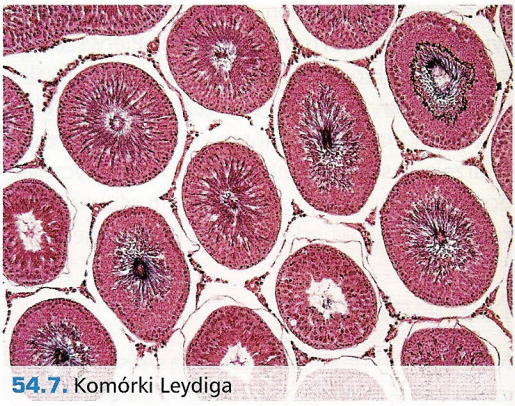
Stosunkowo duży narząd zlokalizowany w śródpiersiu za mostkiem. Największą masę osiąga około 3. roku życia człowieka i zachowuje ją do momentu uzyskania dojrzałości płciowej przez niego. Po tym zaczyna stopniowo zanikać. Grasica odgrywa dużą rolę w dojrzewaniu limfocytów (patrz też rozdz. 39.). Produkowane przez nią hormony również uczestniczą w mechanizmach odpornościowych organizmu.

Gonady żeńskie

Jajniki podejmują aktywność wydzielniczą dopiero w okresie dojrzewania. Dwoma najważniejszymi produkowanymi przez nie hormonami są **estradiol** oraz **progesteron**. Ich synteza ma charakter cykliczny. Główne zadania tych hormonów – regulacja przemian w obrębie błony śluzowej macicy w cyklu miesiączkowym – zostaną szczegółowo omówione w rozdziale 60.

Gonady męskie

Główną funkcją jąder jako gruczołu dokrewnego jest produkcja męskiego hormonu płciowego – testosteronu. Sterują tym **komórki Leydiga** (54.7.) znajdujące się w przestrzeniach między kanalikami nasiennymi. **Testosteron** kształtuje pierwszo- i drugorzędowe męskie cechy płciowe oraz wpływa na prawidłowy przebieg procesu spermatogenezy. Hormon ten pobudza też biosyntezę białek, w rezultacie przyczynia się do zwiększenia masy mięśni. Przyspiesza poza tym tworzenie krwinek czerwonych.



54.7. Komórki Leydiga

PODSUMOWANIE

- Dziedziną zajmującą się poznaniem działania hormonów jest endokrynologia.
- W skład układu hormonalnego wchodzą gruczoły: podwzgórze, przysadka mózgowa, tarczyca, przytarczyce, grasica, wyspy Langerhansa trzustki, kora i rdzeń nadnerczy oraz gonady żeńskie i męskie.
- Podwzgórze reguluje funkcje endokrynne przysadki mózgowej poprzez wydzielanie hormonów uwalniających.
- Przysadka produkuje hormon wzrostu (GH), prolaktynę, tyreotropinę (TSH), kortykotropinę (ACTH), hormon luteinizujący (LH) oraz hormon folikulotropowy (FSH), oksytocynę i wazopresynę.
- Tarczyca wytwarza trójjodotyroninę i tyroksynę zawierające jod i regulujące metabolizm oraz kalcytoninę biorącą udział w regulacji gospodarki wapniowej.
- Działanie antagonistyczne wobec kalcytoniny wykazuje jedyny hormon gruczołów przytarczyc – parathormon.
- Trzustka wydziela insulinę oraz glukagon, biorące udział w regulacji poziomu cukru we krwi.
- Korowa część nadnerczy produkuje aldosteron i kortyzol (hormon stresu), a część rdzeniowa – adrenalinę oraz noradrenalinę.
- Jajniki, czyli gonady żeńskie, produkują estradiol i progesteron.
- Jądra wytwarzają testosteron.

ZADANIA

1. Scharakteryzuj funkcje hormonów uwalniających produkowanych przez podwzgórze.
2. Dokonaj klasyfikacji hormonów przysadki mózgowej odgrywających rolę w przemianach cyklu miesiączkowego.
3. Omów choroby związane z zaburzeniami produkcji hormonu wzrostu.
4. Wymień dwie pary hormonów człowieka działających antagonistycznie wobec siebie. Nazwij tworzące je gruczoły i podaj ich funkcje.

BIBLIOGRAFIA

- Parker S., *Atlas anatomii człowieka*, Wydawnictwo Bellona 2009.

55. Klasyfikacja hormonów

Hormony są grupą związków bardzo zróżnicowaną – zarówno pod względem budowy chemicznej, pełnionych funkcji, miejsca, na które oddziałują, jak również pod względem mechanizmu swojego działania.

Kryteria podziału hormonów

KATEGORIA CZYNNOŚCIOWA

Efektorowe
Działają na odległe tkanki organizmu, modulując ich działanie.

Tropowe
Ich celem jest regulacja wytwarzania hormonów efektorowych.

Uwalniające
Należą tu hormony podwzgórza pobudzające wydzielanie hormonów tropowych przysadki.

Hamujące
Należą tu hormony podwzgórza hamujące wydzielanie hormonów tropowych przysadki.

BUDOWA CHEMICZNA

Hormony białkowe
hormony przysadki, insulina, parathormon

Hormony steroidowe
hormony nadnerczy, hormony płciowe

Pochodne aminokwasów
andrenalina, tyroksyna

MIEJSCE POWSTAWANIA

Hormony gruczołowe
Syntetyzowane są w gruczołach dokrewnych, np. hormony tarczycy.

Hormony tkankowe
Wykazują działanie lokalne, np. w układzie pokarmowym (gastryna).

Neurohormony
Wydzielane są przez komórki nerwowe podwzgórza: wazoprezsyna, oksytocyna.

:: Ciekawostka

Mechanizm działania danego hormonu u większości zwierząt (w tym człowieka) jest identyczny. Co więcej, hormony różnych ssaków, a nierzadko nawet wszystkich kręgowców, mają taki sam skład aminokwasowy i strukturę chemiczną (nie wykazują zatem specyficzności gatunkowej). Dzięki temu można wykorzystywać hormony zwierzęce w terapii medycznej.

Mechanizm działania hormonów

Jak już wspomniano, hormony są roznoszone po organizmie za pośrednictwem układu krwionośnego (stąd inna nazwa układu hormonalnego – dokrewny). Za ich reakcję z komórką docelową odpowiadają białka receptorowe, które mogą się znajdować zarówno na powierzchni błony komórkowej, jak i być rozpuszczone w cytoplazmie.

Dopiero gdy hormon połączy się z receptorem, może wywołać określoną reakcję w obszarze komórki. Obecnie wyróżnia się dwa podstawowe mechanizmy tych zmian:

- **aktywacja enzymów**: większość enzymów wewnątrzkomórkowych oczekuje na moment aktywacji ich czynności katalitycznych. Hormo-

ny, gdy wiążą się z odpowiednimi receptorami komórkowymi, uruchamiają kaskadową reakcję prowadzącą do aktywowania (lub zahamowania) jednego lub większej liczby enzymów. Dokonują tym samym zmian w aktywności metabolicznej komórki;

- **kontrola działania genów**: hormony mogą również wpływać na białka regulatorowe kontrolujące aktywność określonych genów. W ten sposób hormony zmieniają ilość odpowiednich białek i enzymów w komórce.

Niezależnie od reakcji biochemicznych, wywoływanych przez hormony w komórce docelowej, istnieją dwa mechanizmy inicjujące zmiany w komórce poddanej działaniu hormonu: wpływanie na receptory znajdujące się na powierzchni komórki oraz na receptory wewnątrzkomórkowe. To, jaką drogą hormon oddziałuje na komórki docelowe, jest ściśle związane z jego strukturą chemiczną (kryterium budowy chemicznej).

Hormony działające na receptory umiejscowione na powierzchni komórki docelowej

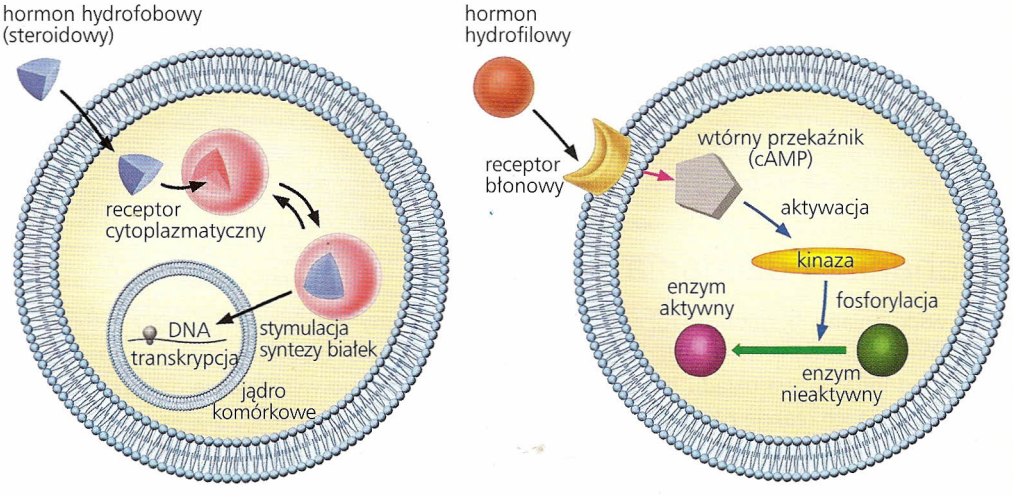
W ten sposób działają hormony o budowie **białkowej** oraz **pochodne aminokwasów** (adrenalina). Dzieje się tak ze względu na **hydrofilowe** właściwości tych związków, które nie są w stanie przeniknąć przez błonę białkowo-lipidową komórki. W związku z tym wiążą się one z receptorami znajdującymi się na powierzchni komórki. Związanie odpowiedniego hormonu z receptorem powoduje uruchamienie przemian biochemicznych prowadzących do powstania w komórce kolejnej sygnałowej cząstki chemicznej, nazywanej wtórnym przekaźnikiem (pierwszym był hormon).

Rolę wtórnego przekaźnika mogą odgrywać różne cząsteczki, a nawet jony. Najczęstszymi są **cykliczny AMP** (cykliczny adenozynomonofosforan = cAMP) oraz **jony wapnia**.

„Wtórny przekaźnik" wzbudza reakcję łańcuchową przemian molekularnych zmieniających fizjologię komórki. Siła działania hormonu pierwotnego związanego z powierzchnią komórki zostaje wielokrotnie wzmocniona. Sama regulacja działania komórki może przebiegać za pomocą obu opisanych wyżej sposobów – zarówno aktywacji enzymów, jak i kontroli działania genów.

Hormony działające za pomocą receptorów wewnątrzkomórkowych

W ten sposób działają hormony dobrze rozpuszczalne w tłuszczach (**hydrofobowe**), które dzięki temu dobrze przenikają przez błonę komórkową. Receptory dla tego typu hormonów (**steroidowych**) znajdują się wewnątrz cytoplazmy. Poza hormonami steroidowymi w ten sposób działają również hormony tarczycy. W tym mechanizmie hormony zwykle wpływają na działanie genów komórki docelowej (nie oddziałują bezpośrednio na enzymy). Wiążą się bezpośrednio z odpowiednim białkiem cytoplazmatycznym wpływającym na działanie genów. Nie ma zatem w tym wypadku żadnych wtórnych przekaźników **(55.1.)**.



55.1. Lokalizacja receptorów specyficznych dla hormonów oraz mechanizm ich wpływu na komórki

Hormony tkankowe i ich rola w organizmie

Okazuje się, że nie tylko gruczoły hormonalne wydzielają substancje działające modulująco na tkanki organizmu. Czynności wewnątrzwydzielnicze wykazuje bowiem wiele tkanek i narządów, np. komórki budujące nerki, nabłonki przewodu pokarmowego czy tkanka tłuszczowa. Typowymi przykładami ważnych hormonów tkankowych organizmu człowieka są: **erytropoetyna** oraz **gastryna**.

:: Ciekawostka

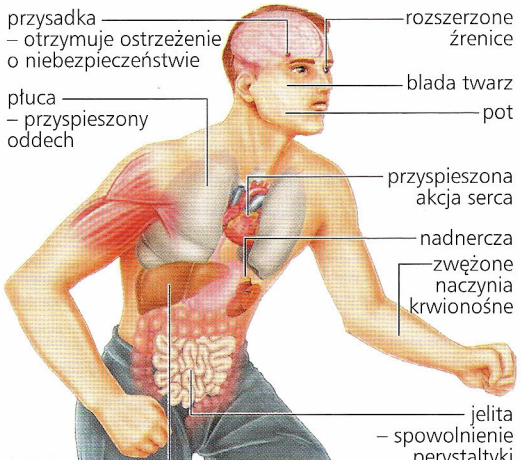
Hormonem peptydowym, wytwarzanym przez tkankę tłuszczową jest leptyna. Intensywność ekspresji genu leptyny jest uzależniona od masy tkanki tłuszczowej (im jej więcej, tym intensywniejsza ekspresja). Leptyna reguluje proces łaknienia. W czasie głodu zmniejsza się jej wydzielanie, a w trakcie spożywania zbyt dużych ilości wysokokalorycznych pokarmów – wzrasta. Leptyna oddziałuje na podwzgórze: powoduje zmniejszenie łaknienia.

Erytropoetyna

Głównym miejscem syntezy erytropoetyny są nerki. W wyniku działania erytropoetyny na komórki macierzyste zlokalizowane w szpiku kostnym dochodzi do przekształcania się niektórych z nich w komórki, które dają początek krwinkom czerwonym.

Gastryna

Jej głównym zadaniem jest regulacja wydzielania kwasu żołądkowego. Gastryna jest wydzielana przez komórki zlokalizowane na pograniczu żołądka i dwunastnicy. Poza zwiększaniem intensywności wydzielania kwasu solnego stymuluje również podziały komórek błony śluzowej żołądka, co ma wpływ na ochronę struktury tego narządu.



Rola adrenaliny

Wydzielana przez część rdzeniową nadnerczy, **adrenalina** jest nazywana hormonem stresu, walki i ucieczki, odgrywa bowiem rolę szczególną w błyskawicznej reakcji organizmu na zagrożenia pojawiające się z zewnątrz **(55.2.)**.

W warunkach normalnych poziom tego hormonu we krwi jest minimalny. W sytuacji stresowej, będącej następstwem przeżyć psychicznych (strachu, gniewu, bólu) lub intensywnego wysiłku fizycznego, wzmaga się produkcja i wydzielanie adrenaliny do krwi. Hormon ten powoduje skurcz naczyń krwionośnych skóry

źrenic, dzięki czemu większa ilość światła wpada do oka i umożliwia lepszą ocenę sytuacji. Pod wpływem adrenaliny spowalniają perystaltyka jelit oraz wydzielanie śliny i innych soków trawiennych. Noradrenalina działa także na mózg – u osoby pod wpływem bardzo silnego stresu wzrasta koncentracja, co ułatwia znalezienie wyjścia z sytuacji zagrożenia.

:: Ciekawostka

Podanie adrenaliny (drogą iniekcji) wywołuje w organizmie bardzo szybkie reakcje, które jednak utrzymują się krótko. Ze względu na wpływ na mięsień sercowy ten hormon doskonale nadaje się do reanimacji pacjentów z zatrzymaniem krążenia. Dzięki zdolności do rozszerzania oskrzeli adrenalina pomaga osobom uczulonym na jad owadów błonkoskrzydłych (np. os, pszczół) i zapobiega pojawieniu się objawów wstrząsu anafilaktycznego.

PODSUMOWANIE



- Pod względem czynnościowym hormony dzielimy na: efektorowe, tropowe, uwalniające oraz hamujące.
- Ze względu na budowę chemiczną wyróżniamy hormony białkowe, steroidowe oraz będące pochodnymi aminokwasów.
- Ze względu na miejsce powstawania istnieją hormony gruczołowe, tkankowe oraz neurohormony wydzielane przez komórki nerwowe.
- Głównymi mechanizmami działania hormonów na komórki jest aktywacja enzymów oraz kontrola działania genów.
- Pobudzenie komórki docelowej przez hormon może się odbywać przez receptor zlokalizowany na powierzchni komórki docelowej lub też za pomocą receptorów wewnątrzkomórkowych.
- Poza hormonami uwalnianymi przez wyspecjalizowane narządy wydzielania wewnętrznego niewielka grupa hormonów jest wytwarzana przez tkanki. Należą do nich erytropoetyna oraz gastryna.
- Hormonem o szczególnym znaczeniu dla organizmu jest adrenalina, nazywana hormonem stresu, walki i ucieczki ze względu na swoje zdolności do mobilizacji całego organizmu w obliczu zagrożenia.

ZADANIA



1. Przedstaw kryteria podziału hormonów.
2. Wymień i scharakteryzuj rodzaje cząsteczek sygnałowych powstających w komórkach, w których doszło do związania hormonu przez receptor powierzchniowy.
3. Wyjaśnij różnicę między hormonem uwalniającym a hormonem tropowym.
4. Omów działanie gastryny.
5. Udowodnij, że adrenalina jest hormonem stresu, walki i ucieczki. Uzasadnij swoją opinię odpowiednimi argumentami.

BIBLIOGRAFIA



- Hoffbauer G., *Mity o hormonach*, Wydawnictwo ABA, 2009.

W INTERNECIE



- http://www.endokrynologia.net/
- http://www.hormonalny.pl/
- http://www.hormony.pl/

56. Rola sprzężeń zwrotnych w układzie hormonalnym

Mechanizmy, dzięki którym organizm może utrzymywać stałe parametry ustroju, zostały dokładnie opisane wcześniej. W tym rozdziale zajmiemy się wyjaśnieniem zjawiska **ujemnego sprzężenia zwrotnego** występującego w złożonym układzie hormonalnym. Zostanie też omówiona nadrzędna rola podwzgórza w regulacji procesów zachodzących w organizmie.

Zjawisko sprzężenia zwrotnego

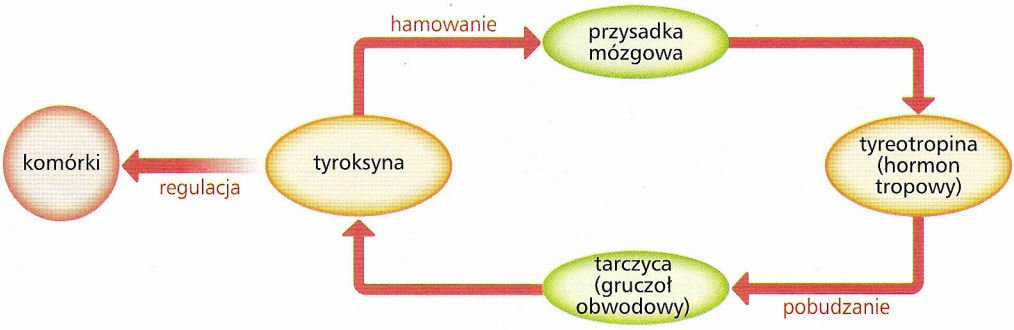
Podstawowym mechanizmem umożliwiającym kontrolę syntezy i wydzielania hormonów jest zjawisko **sprzężenia zwrotnego**. Polega ono na tym, że wydzielony przez gruczoł hormon oddziałuje na odpowiadającą mu komórkę docelową, przez co powoduje zwiększenie wydzielania przez nią pewnej substancji (np. innego hormonu). Ta substancja, poza swoją główną funkcją, działa dodatkowo (czyli zwrotnie) na gruczoł, który wydzielił pierwotny hormon. Sposób, w jaki hormon może działać na gruczoł nadrzędny, jest dwojakiego rodzaju: dlatego opisujemy go jako **sprzężenie zwrotne ujemne** lub **sprzężenie zwrotne dodatnie**.

:: Ciekawostka

Sekrecja większości hormonów nie przebiega w sposób ciągły – wiele hormonów jest wydzielanych pulsacyjnie. Dzieje się tak na przykład z hormonami podwzgórza, przysadki mózgowej czy insuliną. Wydzielanie hormonów zwykle podlega rytmowi okołodobowemu, jednak znane są również rytmy dłuższe, nazywane infradobowymi. Przykładem jest 28-dniowy cykl wydzielniczy żeńskich hormonów płciowych u kobiet.

Sprzężenie zwrotne ujemne

W układzie hormonalnym obowiązuje zasada **gruczołu nadrzędnego**, która sprawia, że na przykład przysadka mózgowa jest powiązana funkcjonalnie z gruczołami pozaprzysadkowymi na zasadzie **ujemnego sprzężenia zwrotnego** (**56.1.**). Działanie tego mechanizmu polega na tym, że efekt danego procesu wykazuje działanie hamujące jego przyczynę. Przykładowo wydzielany przez przysadkę mózgową **hormon tropowy** pobudza gruczoł pozaprzysadkowy do wydzielania hormonu własnego, który działa regulująco na procesy biochemiczne zachodzące w określonych komórkach. Jednocześnie zaś hamuje czynności przysadki mózgowej.



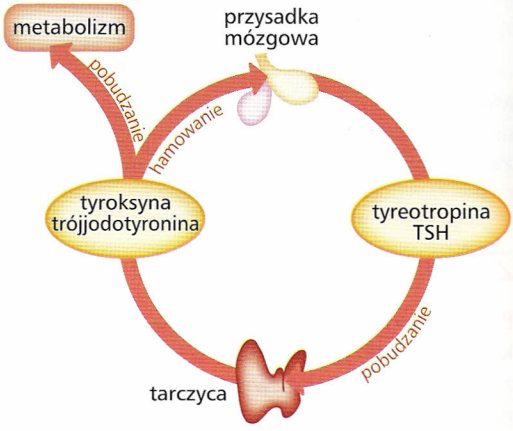
56.1. Współzależność wydzielania przysadki mózgowej i podległego jej gruczołu obwodowego (pozaprzysadkowego)

? Wyjaśnij, który gruczoł na schemacie jest gruczołem nadrzędnym.

Regulacja wydzielania hormonów tarczycy

Każdy etap biosyntezy hormonów tarczycy pozostaje pod ścisłą kontrolą przysadki mózgowej i wydzielanej przez nią **tyreotropiny** (TSH). Zasada ujemnego sprzężenia zwrotnego w przypadku tarczycy polega na tym, że podwyższone stężenie wydzielanych przez nią hormonów (**tyroksyny** i **trójjodotyroniny**) hamuje wydzielanie TSH przez przysadkę mózgową **(56.2.)**. Zatem przy wysokim stężeniu tyreotropiny tarczyca jest silnie stymulowana do produkcji tyroksyny i trójjodotyroniny. Ich stężenie rośnie, co hamuje wydzielanie tyreotropiny przez przysadkę. Skutkuje to zmniejszeniem stymulacji tarczycy i spadkiem wydzielania produkowanych przez nią hormonów.

Ten mechanizm pozwala w prosty sposób utrzymywać stężenie hormonów tarczycy na odpowiednim poziomie. W szczególnych przypadkach mogą jednak występować zaburzenia funkcji tarczycy, które mogą przyjmować postać **niedoczynności** lub **nadczynności tarczycy**.



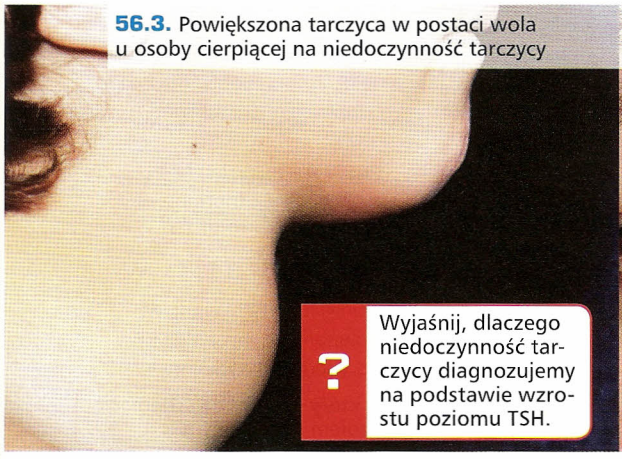
56.2. Zasada ujemnego sprzężenia zwrotnego na przykładzie regulacji wydzielniczej tarczycy

Niedoczynność tarczycy

Dochodzi do niej wtedy, gdy spada wydzielanie hormonów tarczycy. Jest to konsekwencja **niedoborów jodu** w diecie, **autoimmunologicznej choroby Hashimoto** (opisanej w rozdziale 40.) lub **operacyjnego wycięcia** samego narządu. Następstwem spadku poziomu hormonów wydzielanych przez tarczycę jest spowolnienie tempa procesów metabolicznych. Do obserwowanych objawów należy zaliczyć znaczny przyrost masy ciała, słabe i wypadające włosy, suchą skórę, chrypkę. Poza nimi osobie z niedoczynnością tarczycy towarzyszy uczucie zimna, osłabienie mięśni, zwolnienie czynności serca i zmniejszenie jego objętości wyrzutowej. Przysadka mózgowa osób z niedoczynnością tarczycy stara się pobudzić źle działający gruczoł dokrewny, wydzielając duże dawki tyreotropiny (TSH), czym doprowadza do rozrośnięcia się tarczycy w **wole (56.3.)**.

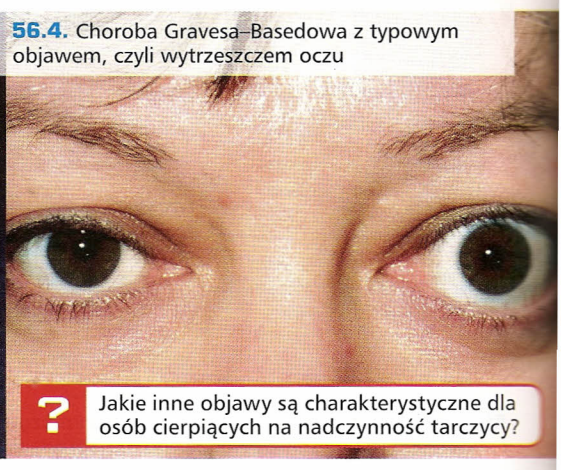
Nadczynność tarczycy

Jest to stan zaburzenia funkcji tarczycy spowodowany nadmierną produkcją wydzielanych przez nią hormonów. Przykładem jednostki chorobowej związanej z nadczynnością tarczycy jest **choroba Gravesa–Basedowa**, należąca do grupy chorób autoimmunologicznych (opisana w rozdziale 40.) **(56.4.)**. W wyniku nadmiernej stymulacji tarczycy



56.3. Powiększona tarczyca w postaci wola u osoby cierpiącej na niedoczynność tarczycy

? Wyjaśnij, dlaczego niedoczynność tarczycy diagnozujemy na podstawie wzrostu poziomu TSH.



56.4. Choroba Gravesa–Basedowa z typowym objawem, czyli wytrzeszczem oczu

? Jakie inne objawy są charakterystyczne dla osób cierpiących na nadczynność tarczycy?

dochodzi do nadprodukcji jej hormonów. Nadmiar hormonów tarczycy powoduje chudnięcie, wzmożoną nerwowość, przyspieszenie akcji i zaburzenie rytmu serca. Charakterystycznymi objawami choroby są też osłabienie siły mięśni oraz wytrzeszcz gałek ocznych.

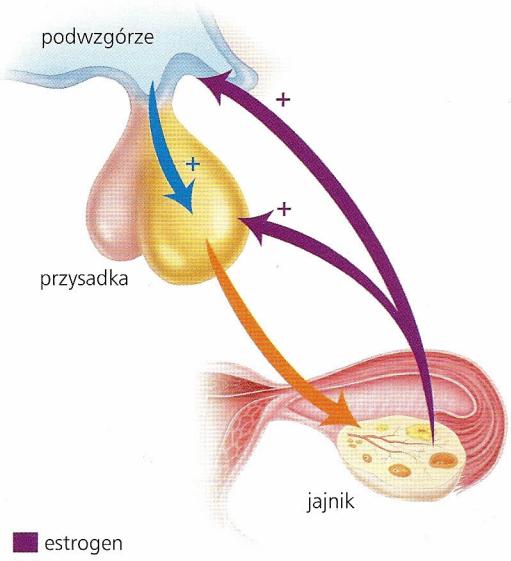
Sprzężenie zwrotne dodatnie

W tym typie samoregulacji układu dokrewnego dochodzi do wzajemnego pubudzania wydzielania homonów. Wzrost stężenia jednego hormonu powoduje stymulację wydzialnia drugiego. Jednak odwrotnie niż w sprzężeniu zwrotnym ujemnym, drugi hormon powoduje stymulację (a nie zmniejszenie) wydzielania pierwszego hormonu. Zatem stężenie obu hormonów będzie cały czas rosło. Sytuacja taka mogłaby teoretycznie trwać bez końca aż do wyczerpania się zasobów w komórkach wydzielniczych. Jednak w momencie gdy stężenie któregoś hormonu osiągnie wartość optymalną, uaktywniają się wydzielane przez podwzgórze hormony hamujące. Ich zadaniem jest wyhamowanie procesu rozpoczętego dodatnim sprzężeniem zwrotnym.

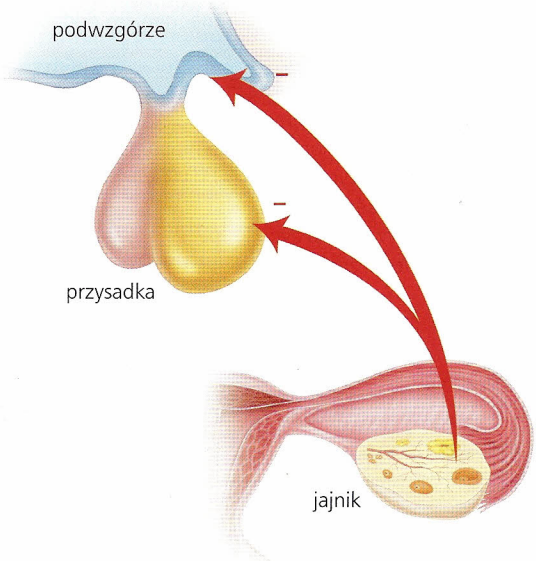
Dobrym przykładem dodatniego sprzężenia zwrotnego jest mechanizm kontrolujący wydzielanie estrogenów u kobiet. W czasie cyklu miesiączkowego, w okresie poprzedzającym owulację niewielkie ilości estrogenów zostają wydzielone do krwiobiegu przez jajniki. Pojawienie się estrogenów we krwi stymuluje podwzgórze do wytworzenia hormonu uwalniającego – gonadoliberyny **(56.5.)**. Stymuluje on w następnej kolejności przysadkę do wydzielania hormonu luteinizującego. Pobudzenie płata przysadki jest również bezpośrednim następstwem działania samych estrogenów. Duże ilości uwolnionego hormonu luteinizującego pobudzają jajniki do jeszcze intensywniejszej produkcji estrogenów.

Po zakończeniu owulacji pęknięty pęcherzyk Graafa przekształca się w ciałko żółte produkujące progesteron. Hormon ten hamuje wydzielanie gonadoliberyn oraz hormonu luteinizującego **(56.6.)**.

? Opisz, na czym polega mechanizm przedstawiony na schemacie.



56.5. Mechanizm sprzężenia zwrotnego dodatniego



56.6. Hamowanie wydzielania hormonów podwzgórza i przysadki przez progesteron

PODSUMOWANIE

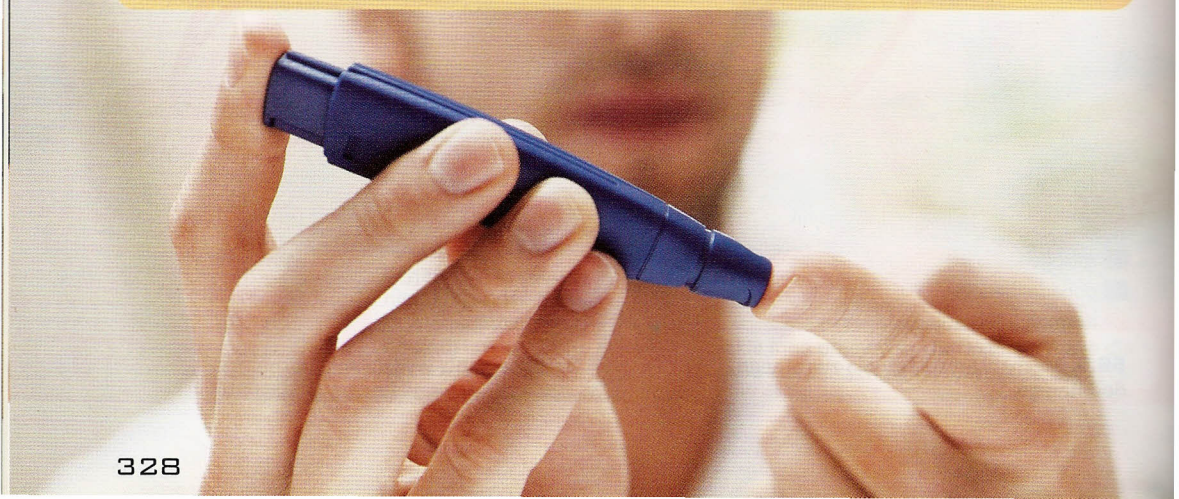
- Podstawowym mechanizmem zapewniającym kontrolę syntezy i wydzielania hormonów jest sprzężenie zwrotne.
- Wyróżniamy dwa rodzaje sprzężenia zwrotnego: ujemne lub dodatnie.
- Ze sprzężeniem zwrotnym ujemnym mamy do czynienia wtedy, gdy efekt danego procesu (wydzielenie hormonu) wpływa na zahamowanie jego przyczyny (działanie gruczołu nadrzędnego).
- Przykładem sprzężenia zwrotnego ujemnego jest regulacja czynności tarczycy przez przysadkę mózgową.
- Przykładem sprzężenia zwrotnego dodatniego jest stymulacja wydzielania estrogenów w czasie cyklu menstruacyjnego.
- Za regulację wydzielania hormonów tarczycy odpowiada przysadka mózgowa za pośrednictwem tyreotropiny (TSH).
- Wysoki poziom TSH pobudza tarczycę do produkcji tyroksyny i trójjodotyroniny, co w efekcie zmniejsza aktywność wydzielania TSH przez przysadkę.
- Do zaburzeń funkcji tarczycy należą niedoczynność oraz nadczynność tego gruczołu.
- Niedoczynność tarczycy objawia się spadkiem wydzielania hormonów przez ten gruczoł, co może być konsekwencją braku jodu w diecie, wycięcia tarczycy lub autoimmunologicznej choroby Hashimoto.
- Pacjenci cierpiący na niedoczynność tarczycy wykazują spadek tempa procesów metabolicznych i mają wole, czyli rozrośnięty gruczoł tarczycy.
- Przykładem zaburzenia związanego z nadczynnością tarczycy jest choroba Gravesa–Basedowa.
- Objawami choroby Gravesa–Basedowa są: chudnięcie, nerwowość, wytrzeszcz oczu, zaburzenie rytmu serca.

ZADANIA

1. Opisz na przykładzie mechanizm ujemnego sprzężenia zwrotnego.
2. Omów, dlaczego w przypadku niedoczynności tarczycy dochodzi do wzrostu stężenia hormonów TSH.
3. Porównaj chorobę Hashimoto i chorobę Gravesa–Basedowa.
4. Objaśnij na przykładzie mechanizm dodatniego sprzężenia zwrotnego.

W INTERNECIE

- http://www.hashimoto.pl/
- http://www.choroba-hashimoto.pl/
- http://tarczyca.net.pl/2010/07/14/choroba-gravesa-basedowa/
- http://basedow.pl/
- http://www.cukrzyca12.pl/
- http://cukrzyca.pl/



57. Regulacja hormonalna

Nie wszystkie procesy zachodzące w układzie hormonalnym mają charakter sprzężeń zwrotnych. Utrzymanie homeostazy pewnych parametrów fizjologicznych organizmu wymaga współpracy dwóch hormonów – **antagonistów**. Przykładem regulacji parametrów organizmu za pomocą hormonów działających przeciwstawnie wobec siebie jest regulacja poziomu cukru i poziomu wapnia.

Regulacja poziomu cukru przykładem antagonizmu w działaniu hormonów

Utrzymanie stężenia glukozy we krwi na odpowiednim poziomie jest szczególnie ważne ze względu na fakt, że ten cukier jest najważniejszym substratem metabolicznym dla każdej komórki ciała. Szczególnie istotne jest utrzymanie stałego poziomu glukozy dla komórek nerwowych, które z racji intensywnego tempa swojego metabolizmu nie są w stanie wytworzyć żadnych rezerw. Niedługo po spożytym posiłku poziom cukru we krwi może znacznie wzrosnąć. W zdrowym organizmie ten stan po uruchomieniu mechanizmów homeostatycznych szybko zostaje naprawiony. Z kolei gdy poziom cukru znacznie spadnie, to może dojść do utraty przytomności, śpiączki, a nawet śmierci. Za utrzymanie zawartości cukru we krwi na odpowiednim poziomie są odpowiedzialne przede wszystkim dwa antagonistyczne hormony wydzielane przez trzustkę: **insulina** oraz **glukagon**.

Działanie insuliny

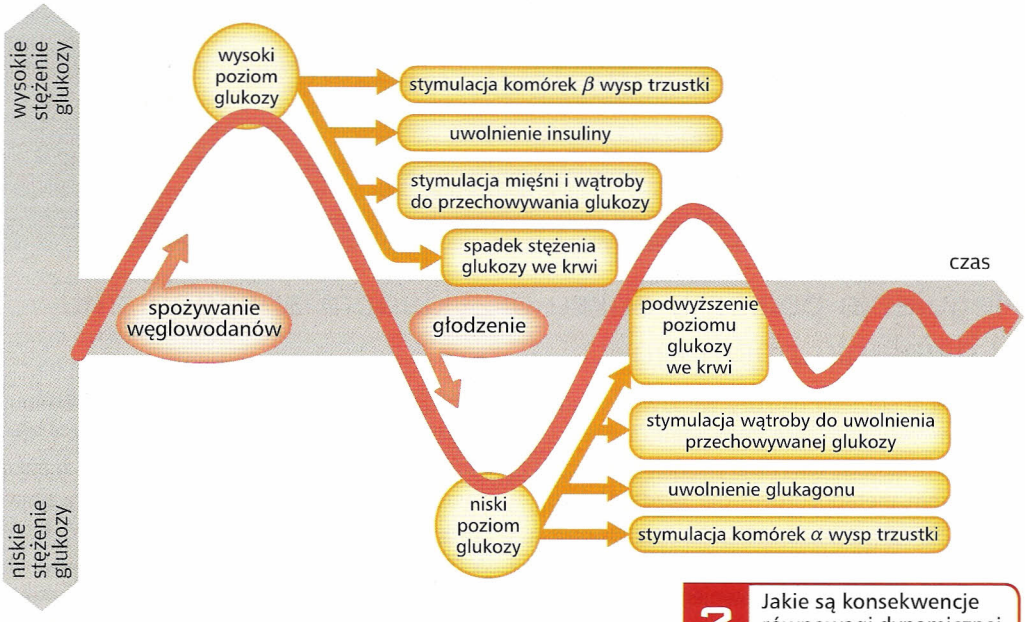
Insulina, wytwarzana w **komórkach β wysp trzustki** (**wysp Langerhansa**), działa na większość komórek i tkanek organizmu: wpływa na biochemiczne procesy przemian białek, węglowodanów oraz lipidów. Obniża stężenie glukozy we krwi, co jest możliwe w wyniku zwiększania tempa wnikania glukozy do komórek. Najbardziej wrażliwe na działanie insuliny są wątroba, mięśnie i tkanka tłuszczowa. Uwalnianie każdego hormonu w organizmie uzależnione jest od obecności właściwego dla niego czynnika uwalniającego – w przypadku insuliny jest to podwyższony poziom cukru w osoczu. Natomiast gdy poziom glukozy we krwi spadnie, wydzielanie insuliny przez trzustkę spada.

Działanie glukagonu

Hormon ten jest antagonistą insuliny. Produkują go **komórki α wysp trzustki**, a działa on w wątrobie. Glukagon stymuluje rozpad glikogenu, czego efektem jest znaczne podwyższenie stężenia glukozy we krwi. Działa również na tkankę tłuszczową, w której zwiększa tempo uwalniania kwasów tłuszczowych i glicerolu do krwi. W przeciwieństwie do insuliny nie ma wpływu na tkankę mięśni szkieletowych. Wydzielany glukagon sprawia, że podnosi się poziom glukozy we krwi w czasie intensywnego wysiłku fizycznego, stresu lub w sytuacji niedożywienia (głód). Z kolei produkcja tego hormonu jest zahamowana przez wysoki poziom cukru i kwasów tłuszczowych we krwi.

Regulacja poziomu cukru

Z opisu działania insuliny oraz glukagonu wynika, że te hormony mają kluczowe znaczenie dla utrzymania poziomu glukozy we krwi. Zawsze wykazują swoje właściwości w wątrobie (odgrywającej rolę głównego centrum operacyjnego), do której dostają się z trzustki żyłą wrotną wątrobową. Po spożyciu posiłku poziom glukozy wzrasta powyżej standardowych wartości. Stymuluje to komórki β wysp trzustki do wydzielenia insuliny. Hormon wychwytuje glukozę i wbudowuje ją do łańcuchów glikogenu w wątrobie. W miarę jak zwiększa się szybkość wychwytywania glukozy z krwi, jej poziom spada, co z kolei działa hamująco na komórki β. Gdy przerwa w jedzeniu utrzymuje się dość długo lub gdy nasza aktywność fizyczna znacznie wzrośnie, dochodzi do spadku poziomu glukozy poniżej wartości stanowiącej normę, co skutkuje pojawieniem się uczucia głodu. Pobudzone wówczas zostają komórki α w wyspach trzustki: uruchamiają produkcję i wydzielanie glukagonu. Powoduje on uwalnianie glukozy zmagazynowanej w zapasach glikogenu w wątrobie. Uwolniona glukoza trafia do krwi,



57.1. Dynamiczna równowaga poziomu cukru spowodowana antagonistycznym działaniem hormonów trzustki

? Jakie są konsekwencje równowagi dynamicznej poziomu cukru?

dzięki czemu wzrasta poziom cukru. Wszystkie te procesy pozostają ze sobą w równowadze dynamicznej **(57.1.)**.

Zaburzenia regulacji poziomu cukru

Polska nazwa „cukrzyca" każdemu z nas kojarzy się z nadmiarem cukru. Ponieważ na różne postacie cukrzycy cierpi około 5% społeczeństwa, a liczba nowych przypadków lawinowo wzrasta, osiąga ona obecnie rangę choroby społecznej. Cukrzyca to przede wszystkim poważne zaburzenie metaboliczne objawiające się przewlekłą **hiperglikemią**, czyli podwyższonym poziomem cukru we krwi. Do tego podstawowego objawu dochodzą zaburzenia przemiany tłuszczów i białek. Wszystkie objawy związane z cukrzycą są spowodowane brakiem wydzielania insuliny lub zmniejszoną wrażliwością na nią tkanek docelowych. W terapii cukrzycy pacjentowi podaje się brakujący hormon poprzez iniekcje lub za pomocą pompy insulinowej oraz stosuje się odpowiednio zbilansowaną dietę **(57.2.)**.

Insulina ludzka wytwarzana przez bakterie *Escherichia coli* była jednym z pierwszych białek produkowanych komercyjnie z użyciem technik inżynierii genetycznej. Wcześniej insulinę uzyskiwano z surowicy zwierząt (krów, koni lub owiec), jednak wiele osób wykazywało objawy alergii na

:: Ciekawostka

Cukrzyca ciężarnych jest to postać cukrzycy rozpoznawana u zdrowych dotąd kobiet w czasie ciąży. Ocenia się, że pojawia się w 3% wszystkich ciąż (zwykle w II i III trymestrze ciąży). Hiperglikemia ciążowa jest spowodowana zwiększonym wydzielaniem hormonów działających antagonistycznie do insuliny (progesteron, estrogeny, kortyzol). Niebezpieczne podwyższenie poziomu glukozy we krwi matki wpływa bezpośrednio na stężenie tego cukru we krwi dziecka (glukoza przenika przez łożysko). Zmusza to trzustkę rozwijającego się płodu do produkcji zwiększonych dawek insuliny.



57.2. Pompa insulinowa znacznie poprawia komfort życia pacjentów cierpiących na cukrzycę.

białka obcego pochodzenia. Biotechnologia pozwala zatem uniknąć problemów z nietolerancją zwierzęcych białek.

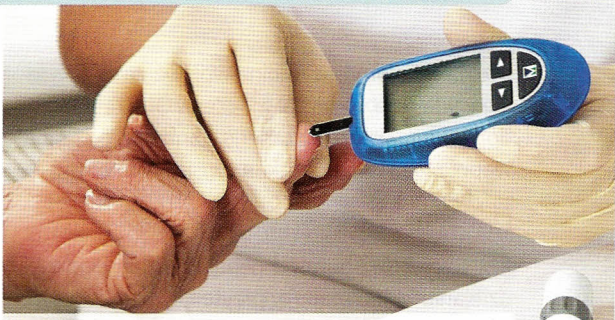
Cukrzyca nie jest chorobą jednorodną. Wyróżniamy jej dwa podstawowe typy oraz kilka sytuacji, w których również może dochodzić do zaburzenia regulacji poziomu cukru.

Cukrzyca typu 1

Ten typ cukrzycy jest spowodowany zniszczeniem komórek β trzustki w wyniku działania przeciwciał skierowanych przeciwko antygenom na powierzchni komórek wysp Langerhansa. Po zniszczeniu wszystkich komórek β poziom przeciwciał spada niemal do zera. Ten typ cukrzycy występuje u około 10% wszystkich diabetyków. Choroba rozpoczyna się już u młodzieży i dorosłych poniżej 30. roku życia. Do typowych symptomów należy podwyższony poziom cukru we krwi spowodowany całkowitym brakiem wydzielania insuliny. Leczenie polega na podawaniu hormonu, co jest niezbędnym warunkiem przeżycia **(57.3.)**. W przeciwnym wypadku dochodzi do śpiączki i śmierci. Z tego względu ten typ cukrzycy nosi również nazwę **cukrzycy insulinozależnej**.

Cukrzyca typu 2

Przyczyny cukrzycy typu 2 są nieco inne. Przede wszystkim jest nią spadek wrażliwości na insulinę (insulinooporność) tkanek, na które zwykle działa ten hormon, oraz wydzielanie go w niedostatecznej ilości przez trzustkę. Zjawisko insulinooporności



57.3. Ważnym elementem terapii cukrzycy jest prawidłowe oznaczenie poziomu glukozy, dokonywane za pomocą glukometru.

polega na tym, że insulina mało wydajnie wpływa na transport glukozy do komórek docelowych. Jest to najczęściej występująca postać choroby (ok. 80–90% chorych), typowa dla krajów wysoko rozwiniętych, a prawdopodobieństwo jej wystąpienia u osób po 35. roku życia ocenia się na 10 do 15%. W rozwoju tego typu cukrzycy dużą rolę odgrywają czynniki genetyczne, jednak największy wpływ ma środowisko i sposób funkcjonowania w nim człowieka. Najważniejszym czynnikiem środowiskowym jest otyłość brzuszna, brak aktywności fizycznej oraz proces starzenia się. Choroba w początkowej fazie rozwija się bardzo powoli i nie ma szczególnych objawów klinicznych. Utrzymująca się latami hiperglikemia prowadzi jednak do wielu powikłań, głównie ze strony układu sercowo-naczyniowego. W początkowym etapie choroby pacjenci nie wymagają włączania iniekcji insulinowych, czasami daje się tego uniknąć nawet przez całe życie. Inna nazwa tego typu cukrzycy to **cukrzyca insulinoniezależna**.

Regulacja poziomu wapnia

W ciele człowieka znajduje się około 1,1 kg wapnia, z czego 99% w układzie szkieletowym. W osoczu wapń krąży w postaci jonowej. Funkcje, jakie pełni wapń w komórkach i tkankach, są bardzo zróżnicowane. Pierwiastek ten odgrywa ważną rolę w procesie krzepnięcia krwi, warunkuje sprawne przewodzenie impulsów nerwowych w synapsach, wpływa na prawidłowy skurcz mięśni szkieletowych i działania układu dokrewnego. Zachwianie poziomu wapnia ma poważne konsekwencje. Typowymi objawami niedoboru są nadmierne i niekontrolowane skurcze mięśni szkieletowych oraz nadmierna pobudliwość nerwowa. W przypadku podwyższonego stężenia wapnia w osoczu może dojść do zapadnięcia pacjenta w śpiączkę.

W organizmie niemiernie ważna jest sprawna regulacja poziomu wapnia. Metabolizm wapnia odbywa się za pomocą dwóch hormonów: **kalcytoniny** i **parathormonu**.

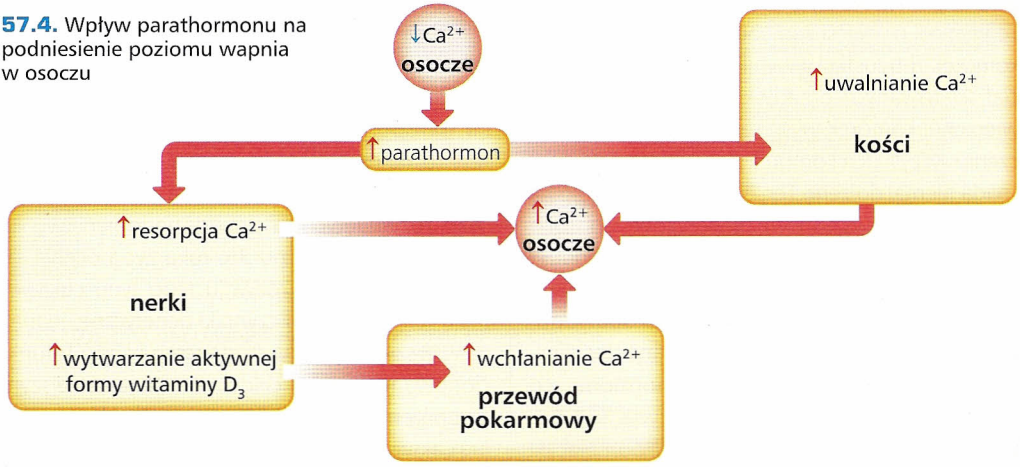
Kalcytonina

Jest to hormon wytwarzany w tarczycy. Głównym impulsem do wydzielenia do krwi dużej ilości kalcytoniny jest wzrost stężenia wapnia. Kalcytonina jest peptydem, hamuje uwalnianie tego pierwiastka z kości poprzez zatrzymanie działania aktywnych osteoklastów (komórek kościogub-

nych). Poza tym kalcytonina wpływa na zwiększenie wydalania wapnia z moczem. Oba te procesy doprowadzają do znacznego obniżenia poziomu wapnia we krwi w krótkim czasie.

Parathormon

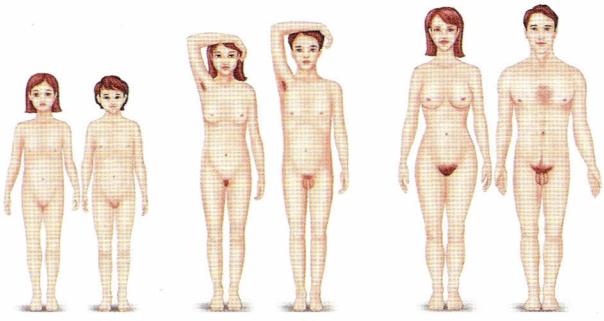
Jest to również hormon peptydowy. Za jego wydzielanie odpowiadają przytarczyce. Głównym czynnikiem stymulującym wydzielanie parathormonu jest spadek stężenia wapnia w surowicy **(57.4.)**. Zadanie parathormonu to przede wszystkim stymulacja osteoklastów do zwiększenia aktywności. Parathormon w nerkach podnosi poziom zwrotnego wchłaniania wapnia. Przyspiesza również tworzenie aktywnej formy witaminy D_3, która wspomaga wchłanianie wapnia w jelitach.



57.4. Wpływ parathormonu na podniesienie poziomu wapnia w osoczu

Rola hormonów w dojrzewaniu

Procesem dojrzewania nazywamy całokształt przemian, którym podlega organizm dziecka przekształcający się w organizm osoby dorosłej. Zmiany, które zachodzą w trakcie tego procesu, są spowodowane przede wszystkim przez wzmożone procesy wydzielnicze **gruczołów dokrewnych**. Największą rolę w tym procesie odgrywają hormony wydzielane przez przysadkę mózgową, nadnercza oraz gonady (gruczoły płciowe). Nadrzędną rolę, co oczywiste, odgrywają tutaj hormony wydzielane przez przysadkę mózgową (tyreotropina, hormon wzrostu, LH oraz FSH), które docelowo pobudzają do działania tarczycę i korę nadnerczy. Przyspieszają one również rozwój żeńskich gruczołów płciowych (jajniki) oraz męskich (jądra), stanowiących **pierwszorzędowe cechy płciowe (57.6.)**. Hormony nadnerczy wpływają na pojawienie się **drugorzędnych cech płciowych** takich jak rozwój warg sromowych, łechtaczki, pochwy, macicy i jajowodów (u dziewcząt) oraz moszny, nasieniowodów i prącia (u chłopców). Dojrzałe gruczoły płciowe natomiast produkują hormony (estrogeny, testosteron) warunkujące rozwój **trzeciorzędowych cech płciowych**, do których należą u dziewczynek: typowo kobiece proporcje budowy ciała (szerokie biodra), specyficzne dla kobiet rozłożenie tkanki tłuszczowej, wzrost piersi i charakterystyczne owłosienie. U chłopców trzeciorzędowe cechy płciowe mają postać męskiej muskulatury i budowy ciała (wąskie biodra, szerokie ramiona), obniżenia wysokości głosu (mutacja), rozrost chrząstki tarczowatej (tzw. jabłko Adama) oraz owłosienia typowego dla



57.6. Zróżnicowanie fizyczne kobiet i mężczyzn na różnych etapach dojrzewania

mężczyzn. Okazuje się również, że istnieje zależność między osiągnięciem ostatecznego poziomu rozwoju przez organy płciowe a zahamowaniem wzrostu kośćca. Również tempo procesu dojrzewania płciowego u dziewcząt i chłopców nie jest jednakowe. Dziewczęta dojrzewają szybciej od chłopców o mniej więcej 2 lata.

Za moment osiągnięcia dojrzałości u dziewcząt przyjmuje się wystąpienie pierwszego krwawienia miesięcznego (menstruacja), która zwykle przypada w okolicach 13.–14. roku życia. U chłopców kryterium dojrzałości nie jest tak oczywiste i często przyjmuje się za nie pierwszy wytrysk nasienia i mutację głosu, przypadające między 15. a 16. rokiem życia. Przedstawione progi wiekowe mają oczywiście charakter ściśle umowny, gdyż obserwuje się występowanie bardzo znacznych różnic indywidualnych, wynikających z przyczyn o podłożu genetycznym lub środowiskowym. Należą do nich: typ budowy ciała, ogólny stan zdrowia, klimat, stan odżywienia, środowisko społeczne i liczebność rodziny, a także warunki ekonomiczne. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że osiągnięcie dojrzałości seksualnej jest jedynie wyznacznikiem potencjalnej zdolności do rozrodu. W okresie dojrzewania powiększają się również układ szkieletowy i wszystkie narządy ciała (serce, płuca, wątroba, nerki). Dopiero po zakończeniu ich wzrostu możemy mówić o pełnej dojrzałości cielesnej.

PODSUMOWANIE



- Regulacja wielu procesów w organizmie przebiega przy udziale hormonów o działaniu przeciwstawnym względem siebie (antagonistycznych).
- Przykładem tego jest regulacja poziomu cukru i wapnia w organizmie.
- Regulacja poziomu cukru we krwi zależy od insuliny i glukagonu produkowanych przez trzustkę.
- Insulina działa na większość komórek i tkanek organizmu: wpływa na procesy przemian białek, węglowodanów oraz lipidów. Jednak jej najważniejszą rolą jest obniżanie poziomu glukozy we krwi dzięki większemu wnikaniu tego cukru do komórek.
- Antagonistą glukozy jest glukagon, który działanie swe ujawnia głównie w wątrobie, gdzie stymuluje proces uwalniania zmagazynowanej tam glukozy.
- Komórki wytwarzające insulinę (komórki β) i glikogenu (komórki α) są stymulowane odpowiednio wysokim i niskim poziomem cukru.
- Podstawowym i trwałym zaburzeniem regulacji poziomu cukru jest cukrzyca.
- Regulacja poziomu wapnia odbywa się dzięki działaniu hormonów tarczycy (kalcytriol) i przytarczyc (parathormon).
- Obniżenie poziomu wapnia we krwi zapewnia kalcytonia, która hamuje uwalnianie wapnia z kości i przyspiesza wydalanie tego pierwiastka z moczem.
- Podwyższenie poziomu wapnia zapewnia parathormon wydzielany przez przytarczyce.
- Ważną rolę w regulacji poziomu wapnia odgrywa także witamina D_3.
- Hormony są również bardzo ważne w procesie dojrzewania organizmu (hormony przysadki mózgowej, nadnerczy oraz gonad (gruczołów płciowych).
- Hormony przysadki stymulują rozwój pierwszorzędowych cech płciowych, hormony nadnerczy – cech drugorzędowych, a gonady – trzeciorzędowych.

ZADANIA



1. Przedstaw antagonizm działania insuliny i glukagonu.
2. Omów czynniki sprzyjające wydzielaniu insuliny i glukagonu.
3. Porównaj cukrzycę typu 1 i 2.
4. Wyjaśnij mechanizm regulacji poziomu wapnia we krwi przez parathormon i kalcytoninę.
5. Określ rolę witaminy D_3 w regulacji poziomu wapnia we krwi.

BIBLIOGRAFIA



- Rosołowska-Huszcz D., *Żywienie a regulacja hormonalna. Wybrane zagadnienia*, Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, 2005.

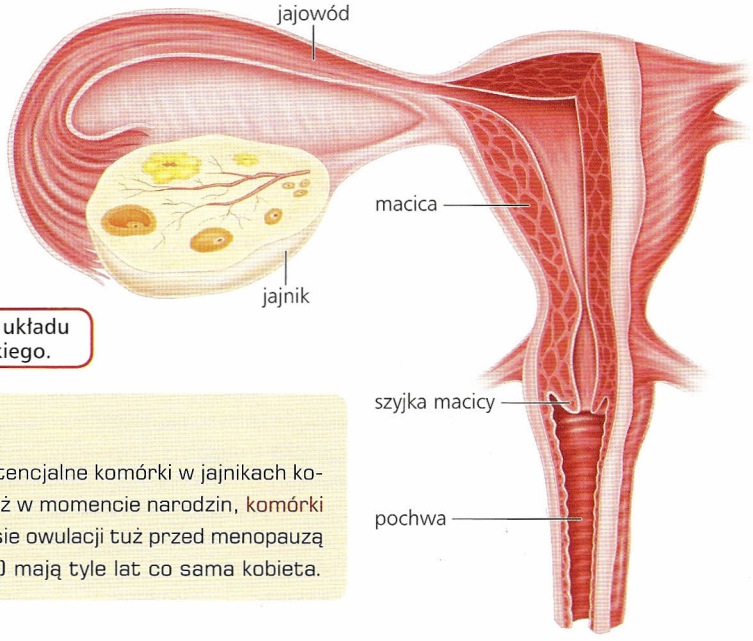
58. Budowa żeńskiego i męskiego układu rozrodczego

Podstawowe zadanie **układu rozrodczego** człowieka i innych zwierząt to doprowadzenie do wydania potomstwa na świat, co jest warunkiem ciągłości gatunku. Sukces tego działania zależy od czynności płciowych podejmowanych przez kobietę i mężczyznę, na które składają się: wytworzenie gamet, czyli komórek płciowych (komórek jajowych i plemników), oraz akt płciowy (kopulacja) zakończony zapłodnieniem. Każdy etap podlega ścisłej kontroli ze strony układu hormonalnego oraz nerwowego.

Budowa i funkcje żeńskich narządów płciowych

Żeński układ rozrodczy w rozwoju człowieka spełnia podwójne zadanie. Odpowiada za **wytwarzanie gamet** (komórek jajowych) i umożliwia ich połączenie z plemnikami, po czym rozwija się w nim powstała **zygota**, a później – **zarodek** i **płód**, który wydostaje się poza obręb układu rozrodczego w czasie porodu. Pod względem anatomicznym żeńskie narządy płciowe dzielimy na **wewnętrzne** (jajniki, jajowody, macica, pochwa) **(58.1.)** oraz **zewnętrzne** (wargi sromowe mniejsze i większe, łechtaczka).

58.1. Budowa układu rozrodczego żeńskiego



? Wymień elementy układu rozrodczego żeńskiego.

:: Ciekawostka

Ponieważ wszystkie potencjalne komórki w jajnikach kobiety są wytworzone już w momencie narodzin, komórki jajowe uwalniane w czasie owulacji tuż przed menopauzą (ok. 45.–50. roku życia) mają tyle lat co sama kobieta.

Wewnętrzne narządy płciowe żeńskie

Jajniki

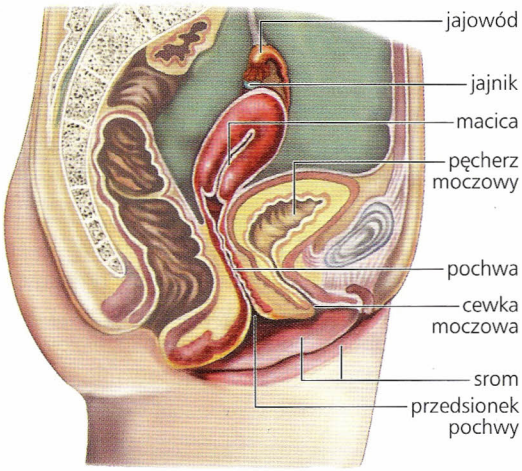
Są to główne parzyste gruczoły płciowe żeńskie położone w miednicy mniejszej. Ich zadaniem jest uwolnienie **komórek jajowych** oraz produkcja **żeńskich hormonów płciowych** (estrogenów oraz progesteronu) sterujących przebiegiem cyklu miesiączkowego. Pojedynczy jajnik ma wielkość orzecha włoskiego i jest wypełniony olbrzymią liczbą tzw. **pierwotnych pęcherzyków jajnikowych**. Każdy z nich jest zbudowany z centralnie położonej komórki jajowej (**oogonium**) otoczonej warstwą odżywiających ją komórek nabłonkowych. Całkowitą liczbę pęcherzyków pierwotnych w każdym jajniku określa się na około 200 tysięcy. Okres płodności kobiety rozpoczyna się w wieku pokwitania (ok. 13.–14. roku życia) i kończy menopauzą w wieku około 50 lat. W tym okresie zostaje uwolnionych z jajnika blisko 400 do 450 komórek.

Jajowody

Są to parzyste, cewkowate przewody, których zadaniem jest przyjęcie i przemieszczenie komórki jajowej z jajnika w kierunku macicy. Jajowody nie są fizycznie połączone z jajnikami. Koniec każdego z nich, sąsiadujący z jajnikiem, tworzy rozszerzenie w kształcie lejka. Gdy komórka jajowa opuści pęcherzyk jajnikowy, zostaje poprzez lejek wprowadzona do jajowodu. Tam na skutek rytmicznych ruchów perystaltycznych jajowodu oraz ruchów rzęsek nabłonka pokrywającego jego wnętrze nieruchoma komórka jajowa może być przemieszczona w kierunku macicy. Do **zapłodnienia** dochodzi w czasie jej wędrówki w **jajowodzie** (58.2.).

Macica

Macica jest miejscem, w którym zapłodniona komórka jajowa (zygota), zarodek, a następnie płód rozwija się przez cały okres **ciąży** (trwający zwykle ok. 280 dni) aż do momentu, gdy będzie zdolny do samodzielnego życia poza organizmem matki. Przez cały okres ciąży to macica dostarcza rozwijającemu się płodowi wszystkich niezbędnych do życia substancji energetycznych i związków budulcowych potrzebnych do tworzenia własnych tkanek. Z chwilą zakończenia rozwoju płodowego macica jako narząd zbudowany z mięśni odgrywa główną rolę w wydaleniu płodu na zewnątrz w czasie porodu. Pod względem kształtu przypomina spłaszczoną gruszkę cieńszym końcem zwróconą ku dołowi. Ścianę macicy buduje gruba na około 2 cm warstwa mięśniowa, pokryta od wewnątrz **błoną śluzową** (**endometrium**). W obrębie szyjki macicy występują gruczoły produkujące galaretowato-śluzową wydzielinę, chroniącą jamę macicy przed wtargnięciem drobnoustrojów chorobotwórczych.



58.2. Żeński układ rozrodczy, widok z boku

Pochwa

Pochwa jest silnie umięśnionym przewodem łączącym przedsionek pochwy z macicą. Zadania pochwy są różnorodne: podczas stosunku wprowadzane jest do niej prącie i dostarczane jest nasienie. Jest też kanałem wyprowadzającym dla płodu w czasie porodu. Tą drogą usuwana jest również krew menstruacyjna i różne substancje produkowane przez macicę. Długość pochwy bywa zmienna i może się wahać od 5 do 14 cm. Błonę śluzową wewnątrz pochwy tworzy **wielowarstwowy nabłonek płaski**, zbliżony do naskórka, lecz nie rogowaciejący. W błonie śluzowej nie występują żadne gruczoły, toteż jest ona zwilżana jedynie przez śluz produkowany w szyjce macicy. U kobiety będącej dziewicą dolny koniec pochwy jest częściowo przesłonięty poprzecznym fałdem błony śluzowej zwanej **błoną dziewiczą**.

Zewnętrzne narządy płciowe żeńskie

Nazywane **sromem**, w skład którego wchodzą:

- **wzgórek łonowy**: stanowi go trójkątna wyniosłość położona nad wargami sromowymi większymi; jego powierzchnia w okresie pokwitania pokrywa się włosami łonowymi;
- **wargi sromowe większe**: mają postać dwóch podłużnych fałdów skórnych, które ograniczają szparę sromową;
- **wargi sromowe mniejsze**: widoczne w szparze sromowej po rozchyleniu warg większych, w postaci dwóch fałdów; podobnie jak wargi sromowe większe pełnią funkcje ochronną;
- **łechtaczka**: nieparzysty narząd odpowiadający za odbieranie wrażeń czuciowych zwiększających pobudzenie płciowe; jest anatomicznym odpowiednikiem męskiego prącia;
- **przedsionek pochwy**: miejsce położone między wargami sromowymi mniejszymi, będące miejscem ujścia pochwy i cewki moczowej.

Budowa i funkcje męskich narządów płciowych wewnętrznych

Jądra

Są najważniejszym parzystym elementem układu rozrodczego męskiego. Głównym zadaniem jąder jest produkcja **gamet męskich** (**plemników**) oraz **hormonów męskich** odpowiedzialnych za pojawienie się i utrzymanie wielu wtórnych cech płciowych męskich. Obydwa jądra znajdują się w worku mosznowym. Do tylnej części jądra przylega najądrze, którym doprowadzane są do jądra naczynia krwionośne oraz nerwy.

Produkcją plemników i funkcjami jąder jako gruczołu hormonalnego sterują hormony LH i FSH, produkowane i uwalniane przez przedni płat przysadki mózgowej. Najważniejszym elementem strukturalnym jądra są cienkie **kanaliki nasienne**, w których zachodzi proces spermatogenezy **(58.3.)**. Pomiędzy kanalikami nasiennymi znajdują się **komórki Leydiga** produkujące androgeny (głównie testosteron).

Najądrze

Jest to skupisko cewek i kanalików odgrywających rolę magazynu plemników, w którym zachodzi proces ich dojrzewania. Najądrze przylega do jądra w jego tylnej części. W najądrzach następuje stopniowe łączenie przewodów wyprowadzających nasienie aż do powstania tylko jednego przewodu przechodzącego ostatecznie w nasieniowód. W drogach przewodzących najądrza plemniki osiągają pełną dojrzałość. Zdolność do zapłodnienia zachowują maksymalnie przez 42 dni **(58.4.)**.

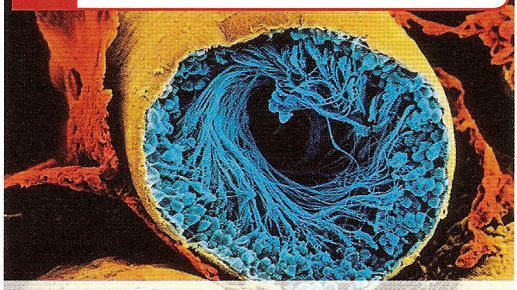
Nasieniowód

Jest przedłużeniem przewodu najądrza, którego celem jest szybkie przemieszczenie nasienia do cewki moczowej. Nasieniowód uchodzi do cewki moczowej w obrębie gruczołu krokowego.

Pęcherzyki nasienne

To parzyste uwypuklenia nasieniowodów. Są gruczołami pomocniczymi, których zasadowa wydzielina zawiera białko zasadowe oraz fruktozę. Fruktoza pełni funkcję zapasowego magazynu energii dla plemników, pobudzając je do ruchu.

? Wyjaśnij znaczenie nieustannej produkcji plemników w kanalikach nasiennych.



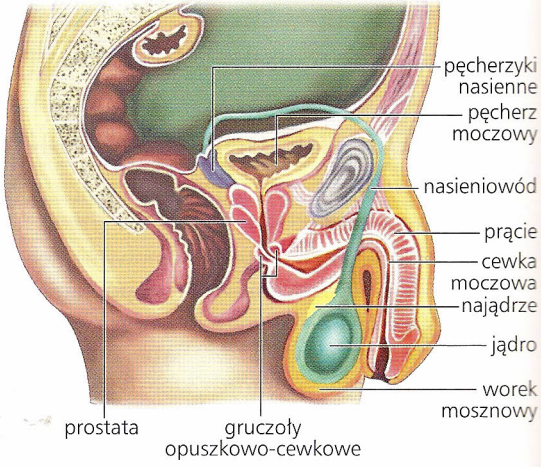
58.3. Przekrój przez kanalik nasienny. Niebieskim kolorem zaznaczono komórki Leydiga.

Gruczoł krokowy

Jest to nieparzysty narząd o średnicy około 4 cm, nazywany inaczej **prostatą** lub sterczem. Przednią jego część przebija **cewka moczowa**, od tyłu docierają do niej **nasieniowody**. Wydzielina prostaty, stanowiąca około 20% masy nasienia, to biaława ciecz o charakterystycznym zapachu i wysokim pH, w której ostatecznie zostają zawieszone plemniki.

Gruczoły opuszkowo-cewkowe

Są to parzyste gruczoły leżące poniżej prostaty, które produkują śluzowatą **wydzielinę**. Jest ona uwalniana obficie podczas stosunku płciowego, a jej zadaniem jest przygotowanie drogi dla nasienia.



58.4. Męski układ rozrodczy, widok z boku

Budowa i funkcje męskich narządów płciowych zewnętrznych

Prącie (członek) to narząd, którego głównym zadaniem jest wprowadzenie porcji nasienia do róg rodnych kobiety w trakcie stosunku płciowego. Przebiegająca wewnątrz prącia **cewka moczowa** stanowi wspólną drogę wyprowadzającą nasienie i mocz. Kształt prącia jest walcowaty, a jego tylna część jest nieruchomo przytwierdzona do spojenia łonowego i kości łonowych. Prącie zakończone jest zgrubieniem zwanym **żołędzią**, na której szczycie znajduje się ujście cewki moczowej. Prącie jest pokryte cienkim fragmentem skóry, na granicy z żołędzią tworzącym fałd – **napletek**. W czasie wzwodu cofa się on, odsłaniając całkowicie żołądź. Dużą część prącia wypełniają **ciała jamiste**. W trakcie stosunku płciowego wypełniają się one krwią tętniczą pod bardzo dużym ciśnieniem, co prowadzi do ich powiększenia i tym samym do wzwodu prącia. Za prawidłowy wzwód odpowiada ośrodek nerwowy położony w odcinku krzyżowym rdzenia kręgowego.

Moszna to worek, w którym poza obszarem ciała leżą **jądra** wraz z najądrzami. Charakterystyczną cechą skóry moszny jest jej ciemniejsza pigmentacja oraz całkowity brak podściółki tłuszczowej, co pozwala na utrzymanie temperatury jąder o 2–3 stopnie mniejszej niż temperatura ciała. Ma to szczególne znaczenie dla procesu **dojrzewania plemników**.

:: Ciekawostka

Choć plemniki żyją do 42 dni, rzadko się zdarza, aby przebywały w przewodach najądrza tak długo. Przy częstych stosunkach zapasy plemników szybko mogą się wyczerpać. Ocenia się, że już trzecia porcja nasienia (ejakulat) w ciągu 12 godzin praktycznie jest pozbawiona plemników, a ponowne napełnienie przewodów najądrza trwa przynajmniej 2 dni. Okresy te są prawdziwe, gdy założymy, że przeciętna liczba plemników w spermie w pełni płodnego mężczyzny wynosi 200 do 300 milionów.



PODSUMOWANIE

- W skład żeńskich narządów rozrodczych wewnętrznych wchodzą: jajniki, jajowody, macica, szyjka macicy, pochwa.
- Zewnętrzne narządy płciowe kobiety określane są jako srom. Należą do nich m.in. wargi sromowe mniejsze i większe oraz łechtaczka.
- Okres płodności kobiety rozpoczyna się w momencie pokwitania (ok. 13. roku życia) i kończy menopauzą w wieku około 50 lat.
- W jajnikach powstają komórki jajowe.
- Macica jest miejscem, w którym zapłodniona komórka jajowa, a później zarodek i płód rozwijają się przez cały okres ciąży.
- Najważniejszym parzystym elementem układu rozrodczego męskiego są jądra, a w nich cienkie kanaliki nasienne, w których zachodzi proces spermatogenezy.
- W najądrzach zachodzi proces dojrzewania plemników.
- Zewnętrzymi narządami rozrodczymi męskimi są prącie i moszna.

ZADANIA

1. Omów rolę, jaką odgrywa mikroflora w pochwie kobiety.
2. Wyjaśnij, co produkują komórki Leydiga i gdzie te komórki są zlokalizowane.
3. Określ rolę wydzieliny pęcherzyków nasiennych.

W INTERNECIE

- http://info.zdrowie.gazeta.pl/temat/zdrowie/uk%C5%82ad+rozrodczy

59. Proces oogenezy i spermatogenezy

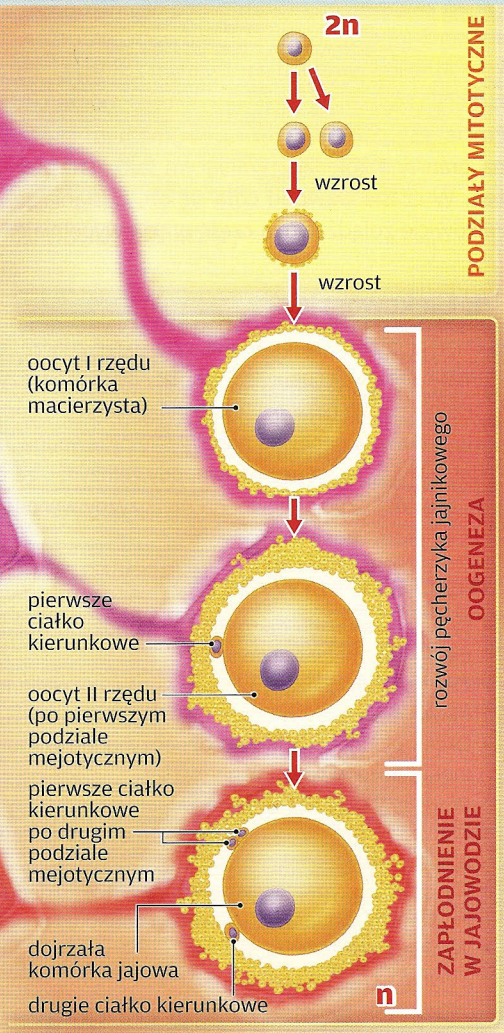
Procesy **spermatogenezy** i **oogenezy** zachodzą w każdym żywym organizmie zwierzęcym i są jedynymi, które odbywają się na drodze podziału redukcyjnego – mejozy. Mimo iż są teoretycznie podobne, to jednak powstawanie komórek płciowych męskich i żeńskich ma różny przebieg zarówno pod względem czasu trwania, jak i budowy powstających komórek. Mają jednak wspólny sens biologiczny, czyli utworzenie haploidalnych gamet, a dzięki temu zapewnienie zróżnicowania genetycznego potomstwa.

OOGENEZA

W czasie rozwoju jajników pierwotne komórki płciowe przekształcają się w komórki macierzyste gamet żeńskich, czyli w **oogonia**, nadal dzieląc się mitotycznie. Następnie rozpoczynają **profazę pierwszego podziału mejotycznego**. Pod koniec profazy proces podziału zostaje czasowo wstrzymany, a przyszłe gamety żeńskie są nazywane w tym momencie **oocytami I-rzędu**.

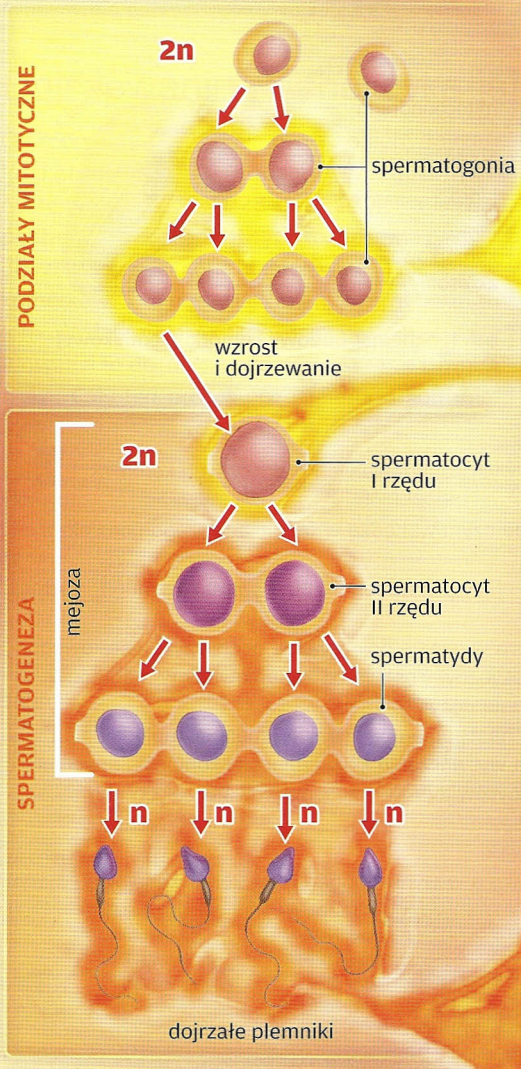
Na dokończenie pierwszej profazy i pierwszego podziału mejotycznego oocyty I-rzędu będą musiały poczekać do okresu pokwitania, czyli do uzyskania dojrzałości płciowej przez dziewczynkę. Wtedy to co 28 dni w jajniku kobiety rośnie i dojrzewa oocyt I rzędu. W wyniku dokończenia pierwszego (redukcyjnego) podziału mejotycznego powstaje **oocyt II-rzędu** zawierający niemal całą cytoplazmę komórki macierzystej oraz **ciałko kierunkowe**.

W trakcie dojrzewania pęcherzyka jajnikowego **oocyt II rzędu** rozpoczyna drugi podział mejotyczny. Jednak i ten zostaje w momencie owulacji zahamowany na etapie metafazy II. Bodźcem do jego dokończenia prowadzącego do utworzenia dojrzałej komórki jajowej (i kolejnego ciałka kierunkowego) jest zapłodnienie. Powstała **komórka jajowa** skupia w sobie w zasadzie całą masę komórki macierzystej, a tworzone niejako pobocznie ciałka kierunkowe szybko degenerują.



Oogeneza jest procesem powstawania i wzrostu żeńskiej komórki jajowej. Procesy oogenezy charakteryzują się cyklicznym przebiegiem. Wszystkie gamety powstają z pierwotnych komórek płciowych, które oddzielają się od komórek somatycznych na bardzo wczesnych etapach rozwoju zarodkowego.

Spermatogeneza jest procesem analogicznym do oogenezy, prowadzącym do powstania zdolnych do zapłodnienia męskich komórek płciowych, czyli **plemników**. Rozwój jąder i jajników przebiega początkowo (na etapie embrionalnym) identycznie. O rozwinięciu się gonady męskiej i przekształceniu pierwotnych komórek płciowych w komórki plemnikowe decyduje obecność chromosomu Y w jądrze komórek.



Pierwotne komórki płciowe dzielą się mitotycznie, a następnie przekształcają się w **spermatogonia**, u osobników młodych wypełniające niemal całkowicie kanaliki nasienne.

Właściwy proces spermatogenezy trwa od chwili osiągnięcia dojrzałości płciowej aż do momentu śmierci. Warunkiem prawidłowego jej przebiegu jest stała obecność żywych i odnawiających się komórek macierzystych gamet, czyli spermatogoniów. Każda z tych komórek wykonuje przez całe życie podziały mitotyczne. Po wielu mitotycznych podziałach powstaje **spermatocyt I rzędu**.

Spermatocyty I rzędu rozpoczynają podział mejotyczny. Po pierwszym podziale redukcyjnym powstają komórki nazywane **spermatocytami II rzędu**, które po drugim podziale redukcyjnym przekształcają się w cztery **spermatydy**. Następnie spermatydy podlegają wielu przemianom, w wyniku czego przekształcają się w dojrzałe plemniki.

? Porównaj proces spermatogenezy i oogenezy.

Budowa plemnika

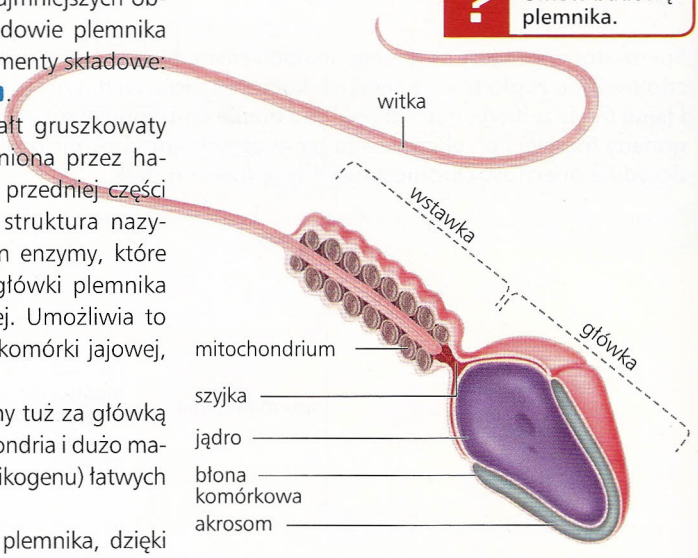
Plemniki człowieka należą do najmniejszych obserwowanych u ssaków. W budowie plemnika wyróżnia się zasadniczo trzy elementy składowe: główkę, wstawkę i witkę **(59.1.)**.

Główka plemnika ma kształt gruszkowaty i jest niemal całkowicie wypełniona przez haploidalne jądro komórkowe. W przedniej części główki znajduje się specjalna struktura nazywana **akrosomem**. Zawiera on enzymy, które są uwalniane przy zetknięciu główki plemnika z powierzchnią komórki jajowej. Umożliwia to plemnikowi penetrację otoczki komórki jajowej, czyli proces zapłodnienia.

Wstawka to obszar położony tuż za główką plemnika. Zawiera liczne mitochondria i dużo materiałów zapasowych (głównie glikogenu) łatwych do przetworzenia.

Witka jest narządem ruchu plemnika, dzięki któremu może się on poruszać w drogach rodnych kobiety z prędkością do około 20 cm na godzinę.

? Omów budowę plemnika.



59.1. Schemat budowy komórki plemnikowej człowieka

PODSUMOWANIE

- Wszystkie gamety pochodzą z bardzo wąsko wyspecjalizowanych pierwotnych komórek płciowych.
- Oogonia dzielą się wielokrotnie mitotycznie, po czym wchodzą w fazę pierwszego podziału mejotycznego.
- Podział ten zostaje zatrzymany pod koniec profazy pierwszego podziału mejotycznego, a komórka nosi nazwę oocytu I rzędu.
- Pierwszy podział mejotyczny kończy się dopiero w czasie dojrzewania pęcherzyka jajnikowego, a komórka od razu zaczyna drugi podział mejotyczny. Zostaje on zahamowany w momencie owulacji na etapie metafazy. W efekcie powstaje oocyt II rzędu.
- Dokończenie drugiego podziału mejotycznego następuje dopiero w momencie zapłodnienia.
- W trakcie dojrzewania plemników dochodzi do wytworzenia kilku generacji komórek: spermatogoniów, spermatocytów I rzędu, spermatocytów II rzędu, spermatyd, dojrzałych gamet (plemników).
- Plemniki składają się z główki, wstawki oraz witki.
- W wyniku spermatogenezy powstają 4 plemniki, a w wyniku oogenezy 1 komórka jajowa i ciałka kierunkowe.

ZADANIA

1. Omów przebieg procesu oogenezy.
2. Omów przebieg procesu spermatogenezy.
3. Wyjaśnij znaczenie podziału redukcyjnego dla życia organizmów zwierzęcych.
4. Omów budowę plemnika z uwzględnieniem przystosowań do pełnionych funkcji.

W INTERNECIE

- http://www.embryology.ch/anglais/cgametogen/vergleich01.html

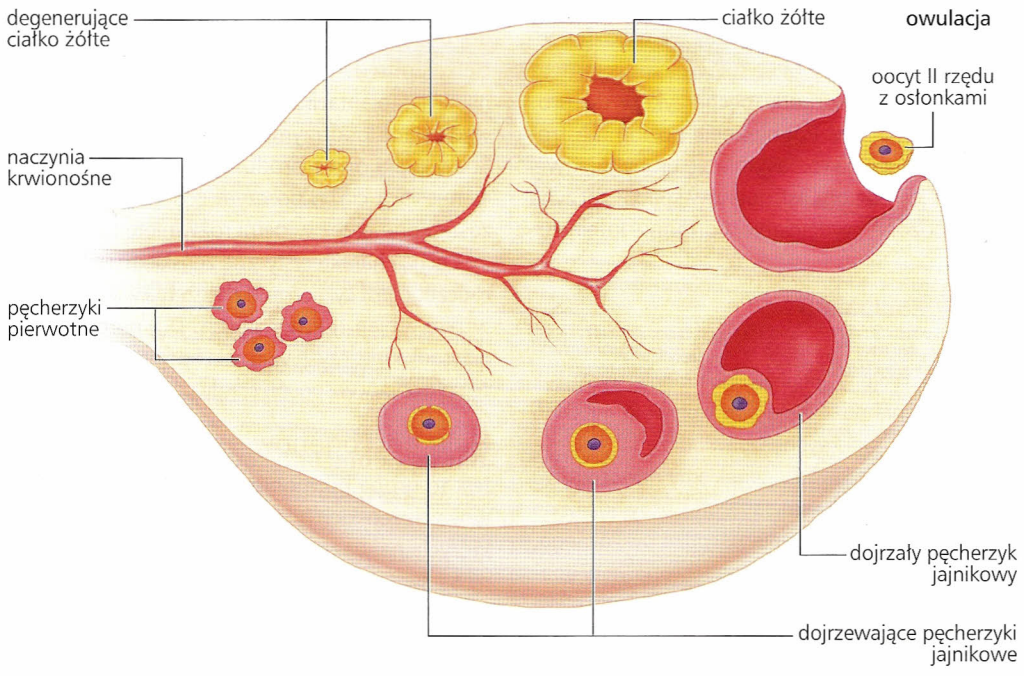
60. Cykl menstruacyjny i fizjologia procesu zapłodnienia

Układ narządów rozrodczych kobiet podlega regularnym cyklicznym przemianom, aby w ten sposób przygotować się do możliwego zapłodnienia i ciąży. Przyjmuje się, że typowy cykl przemian, nazywany **cyklem miesięcznym** lub **cyklem menstruacyjnym**, trwa u kobiety 28 dni (miesiąc księżycowy, lunarny) i jest całkowicie podporządkowany działaniu hormonów gonadotropowych przysadki mózgowej. Za początek cyklu przyjmuje się **pierwszy dzień krwawienia**, końcem cyklu jest natomiast dzień poprzedzający kolejne krwawienie.

Dojrzewanie pęcherzyka jajnikowego

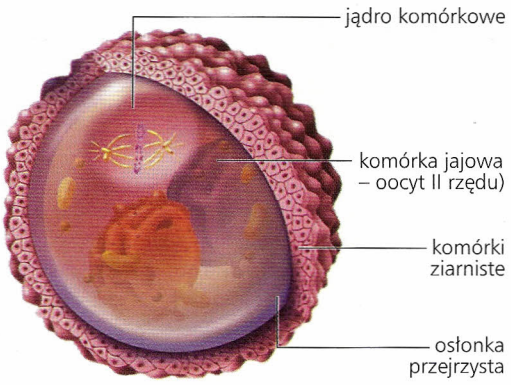
Od momentu osiągnięcia przez kobietę dojrzałości płciowej aż do menopauzy w regularnych odstępach (zwykle co 28 dni) niewielka liczba **pęcherzyków pierwotnych** rozpoczyna proces dojrzewania. Komórki nabłonkowe otaczające komórkę jajową podlegają intensywnym podziałom. Wydzielają płyn, który wypełnia pęcherzyk. Prowadzi to do znacznego powiększenia pęcherzyka. Cały ten proces pozostaje pod kontrolą hormonu folikulotropowego (FSH) wydzielanego przez przedni płat przysadki mózgowej. Po zakończeniu tego procesu pęcherzyk ma około 10 mm średnicy i jest doskonale widoczny na obrazie USG. Znajdująca się w jego wnętrzu komórka jajowa, mimo że również rośnie, osiąga wielkość zaledwie 0,2 mm. Nie jest ona też jeszcze w pełni dojrzała, znajduje się na etapie **oocytu II rzędu** (60.1.).

? Przeanalizuj rolę ciałka żółtego w przebiegu cyklu miesięcznego. Jaki proces jest w stanie powstrzymać degenerację ciałka żółtego?



60.1. Przemiany zachodzące w jajniku w czasie cyklu miesięcznego

W trakcie każdego cyklu miesięcznego dojrzewa zwykle tylko jeden pęcherzyk, na tym etapie określany jako **pęcherzyk jajnikowy** (**pęcherzyk Graafa**). Moment jego opróżnienia i uwolnienia komórki jajowej **(60.2.)** nosi nazwę **owulacji** (**jajeczkowania**) i zwykle ma miejsce w połowie cyklu (ok. 14 dnia). U różnych kobiet mogą występować wahania długości cyklu, jednak dotyczą one głównie fazy przedowulacyjnej, gdyż czas od jajeczkowania do kolejnego krwawienia nie ulega zmianie.



60.2. Budowa komórki jajowej

Regulacja hormonalna cyklu miesięcznego

Cyklicznością zmian zachodzących w narządach rodnych kobiety steruje przysadka mózgowa kontrolowana przez podwzgórze. Komórki nerwowe podwzgórza wydzielają neurohormony uwalniające, które oddziałują na komórki przysadki mózgowej. W wyniku pobudzenia zaczyna ona wydzielać dwa hormony:

- **hormon folikulotropowy** (FSH, hormon dojrzewania pęcherzyków)
- **hormon luteinizujący** (LH).

FSH i LH oddziałują wyłącznie na jajniki. Wzrost poziomu FSH obserwowany w fazie początkowej cyklu miesiączkowego powoduje nie tylko dojrzewanie pęcherzyków Graafa (główna funkcja), lecz także stymuluje komórki pęcherzyków do produkcji estrogenów. Podniesienie poziomu estrogenów wpływa na rozrastanie się błony śluzowej macicy. Gdy poziom estrogenów spada, zaczyna się wzmożone wydzielanie hormonu luteinizującego, którego szczytowe stężenie (w połowie cyklu) doprowadza do owulacji.

Po uwolnieniu komórki jajowej do jajowodu komórki tworzące dotychczas ścianę pęcherzyka Graafa zaczynają intensywne podziały. Dzięki żółtemu barwnikowi wypełniającemu ich wnętrze pozostałość po pęcherzyku Graafa zaczyna być od tego momentu nazywana **ciałkiem żółtym**.

Głównym zadaniem ciałka żółtego jest produkcja dużych ilości progesteronu, która trwa nieprzerwanie przez około 14 dni **(60.3.)** od owulacji. Jeżeli w danym cyklu miesięcznym nie dojdzie do zapłodnienia, wówczas po tym okresie ciałko żółte degeneruje. Jeśli dojdzie do zapłodnienia i implantacji zarodka, hormony przez niego wydzielane podtrzymują funkcje ciałka żółtego. Rozwija się ono i produkuje progesteron aż do 4. miesiąca ciąży, po czym zostaje w tej funkcji zastąpione przez w pełni rozwinięte łożysko.

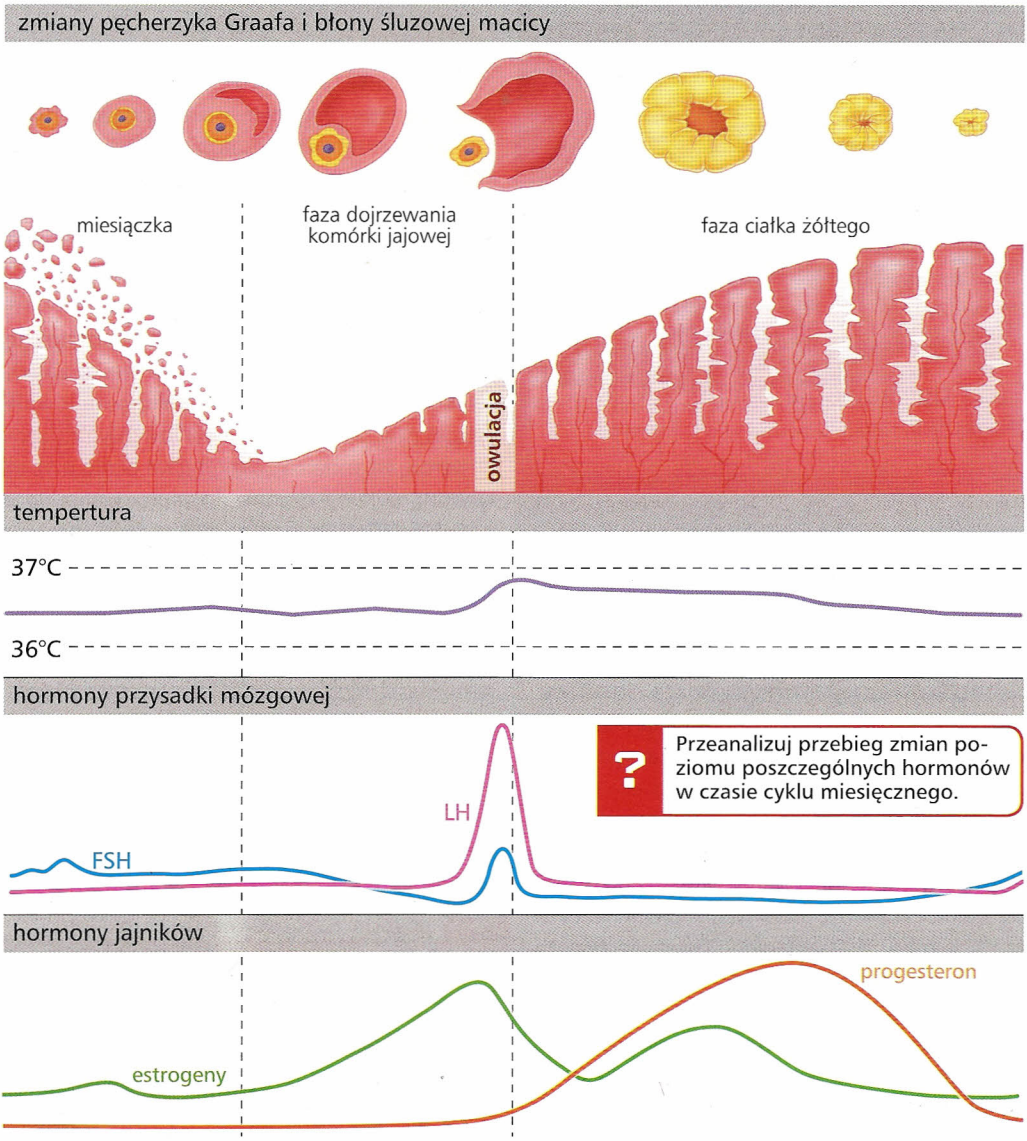
Cechą charakterystyczną żeńskiego układu rozrodczego jest cykliczność natężenia zachodzących w nim zmian hormonalnych. Dla porównania – przysadka mężczyzn wydziela hormony oddziałujące na gonady w sposób ciągły na stałym poziomie.

:: Ciekawostka

Żeński zegar biologiczny zostaje uruchomiony i dostrojony najprawdopodobniej wskutek tego, że nie pozostaje pod wpływem męskich hormonów płciowych. Doświadczenia polegające na wstrzykiwaniu żeńskiemu noworodkowi wysokich dawek testosteronu prowadziły do zahamowania tworzenia ośrodka cyklicznego, co wyzwalało hormony gonadotropowe w sposób ciągły. Również usunięcie przedniego płata przysadki u dorosłej kobiety (np. w wyniku operacji) prowadzi do zaniku czynności jajników.

Rola estrogenów

Jest to grupa hormonów należących do podstawowych żeńskich hormonów płciowych, spośród których najważniejszy jest **estradiol**. Estrogeny są syntetyzowane w jajnikach przez komórki wzrastającego **pęcherzyka Graafa**. W czasie pokwitania u dorastających dziewcząt poziom estrogenów wzrasta ponad 20-krotnie w porównaniu z okresem dziecięcym. Prowadzi do daleko



60.3. Cykliczność zmian poziomu hormonów w czasie cyklu miesięcznego

idących zmian w narządach płciowych dorastającej dziewczynki i do rozwoju kobiecych wtórnych cech płciowych. Powiększają się macica, pochwa i jajowody. Podstawowym jednak zadaniem estrogenów jest stymulacja rozrostu **endometrium**, czyli błony śluzowej macicy i obecnych w niej naczyń krwionośnych. Pod wpływem estrogenów gruczoły śluzowe w szyjce macicy wydzielają śluzowatą substancję ułatwiającą ruch plemników.

Rola progesteronu

Hormon ten dokonuje takich przemian w błonie śluzowej macicy, które umożliwiają **implantację zapłodnionej komórki jajowej**. Wpływa hamująco na podwzgórze i przysadkę mózgową: zmniejsza wydzielanie gonadoliberyny i hormonu luteinizującego. Spadek produkcji LH zmniejsza wydzielanie estrogenów przez jajniki i zatrzymuje nadmierny rozrost endometrium na skutek działania estrogenów.

Progesteron zmniejsza też wrażliwość macicy na oksytocynę wydzielaną przez przysadkę, co powstrzymuje akcję porodową. Może się ona rozpocząć dopiero wtedy, gdy spadnie poziom progesteronu.

Fazy cyklu miesięcznego

Faza miesiączkowa

Faza miesiączkowa rozpoczyna się wraz z krwawieniem z dróg rodnych i jest uznawana za pierwszy dzień nowego cyklu. Podczas tej fazy zachodzi złuszczanie się wydzielniczej warstwy nabłonka macicy i jej stopniowe wydalanie. Proces ten, nazywany **menstruacją** lub po prostu **krwawieniem**, trwa przez kilka dni.

Faza dojrzewania pęcherzyków (folikularna)

W tej fazie dochodzi do odbudowy nabłonka macicy, który musi być umożliwiać zagnieżdżenie zapłodnionej zygoty. Proces ten jest stymulowany zwiększającym się stopniowo poziomem estrogenów.

Faza owulacyjna

Jest to krótka faza rozpoczynająca się wtedy, gdy dojrzały pęcherzyk Graafa pęka i uwalnia do jajowodu komórkę jajową. Następuje to w czasie 36–42 godzin po osiągnięciu maksymalnego stężenia hormonu luteinizującego. Moment uwolnienia komórki jajowej do jajowodu nazywamy **jajeczkowaniem** lub **owulacją**.

Faza ciałka żółtego

Po opróżnieniu pęcherzyk Graafa przekształca się w tymczasowy gruczoł dokrewny (ciałko żółte), którego komórki – dotąd produkujące głównie estrogeny – zaczynają wytwarzać również progesteron. Faza ciałka żółtego trwa około dwóch tygodni, o ile nie dojdzie do zapłodnienia. Jeśli natomiast nastąpi zapłodnienie, wówczas zagnieżdżający się zarodek zaczyna wydzielać do krwiobiegu matki sygnał chemiczny w postaci hormonu gonadotropiny kosmówkowej. Podtrzymuje on funkcje wydzielnicze ciałka żółtego przez następne cztery miesiące oraz rozrost naczyń krwionośnych w obrębie tworzącego się łożyska.

Fizjologia zapłodnienia

Zapłodnieniem nazywamy proces połączenia się dwóch komórek płciowych – plemnika i komórki jajowej. W wyniku tego powstaje **zygota** – pierwsza komórka nowego organizmu. Aby jednak mogło dojść do zapłodnienia, plemnik musi dotrzeć w pobliże komórki jajowej. Energię do tego ruchu czerpie z hydrolizy ATP tworzonego w mitochondriach. Ruchliwość plemników, jak wynika z obserwacji, ma kluczowe znaczenie dla procesu zapłodnienia.

Przemieszczanie się plemników w drogach rodnych

Droga, jaką plemniki muszą pokonać, aby znaleźć się w bezpośrednim sąsiedztwie komórki jajowej, wynosi około 18 cm. Okazuje się, że ruchy własne witki nie są wystarczające do pokonania tego dystansu **(60.4.)**. Bardzo dużą rolę wspomagającą ruch plemników odgrywają skurcze mięśniówki macicy i jajowodów oraz ruch rzęsek wyścielających jajowody.

Podczas przemieszczania się w drogach rodnych istotne zmiany zachodzą również w samych plemnikach. Polegają one między innymi na usunięciu osłonki pokrywającej akrosom. Te zmiany są konieczne dla umożliwienia późniejszego wniknięcia plemnika do komórki jajowej.



60.4. Zdolność plemników do ruchu ma kluczowe znaczenie w procesie zapłodnienia.

Droga plemników w kierunku komórki jajowej rozpoczyna się w **pochwie**. W tym miejscu panują niekorzystne warunki zarówno dla życia, jak i ruchu plemników ze względu na niskie pH. Składniki nasienia częściowo neutralizują **kwaśny odczyn środowiska**, jednocześnie pobudzają ruchliwość plemników.

Jamę macicy plemniki pokonują ruchem czynnym za pomocą witek, wspomaganym przez niewielkie skurcze mięśniówki macicy. W miejscu ujścia jajowodów są zatrzymywane plemniki z defektami strukturalnymi lub nieruchome (martwe). Po wniknięciu do jajowodów plemniki przemieszczają się biernie dzięki ruchom perystaltycznym jajowodu, a także aktywnie dzięki ruchom witek, co pozwala im na poszukiwanie komórki jajowej **(60.5.)**.



? Jakie znaczenie może mieć liczba plemników w nasieniu dla rozwoju tzw. męskiej bezpłodności?

60.5. Plemniki, którym udało się dotrzeć do bańki jajowodu, otaczają znajdującą się tam komórkę jajową.

Wnikanie plemników do komórki jajowej

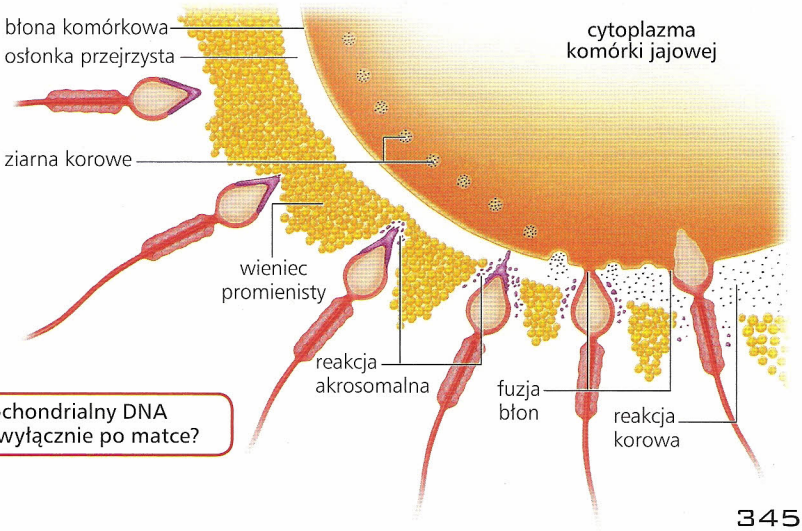
Okres, w którym komórka jajowa może zostać zapłodniona, wynosi zaledwie 48 godzin od momentu uwolnienia. Komórka jest otoczona przez dwie osłonki. Wewnątrz występuje cienka **osłonka przejrzysta.** Otoczona jest przez warstwę komórek pochodzących z pęcherzyka Graafa, tzw. **wieniec promienisty**. Między innymi z tego powodu proces wnikania plemnika do komórki jajowej jest dość skomplikowany. Obejmuje on dwie fazy: **reakcję akrosomalną** oraz **reakcję korową (60.6.)**.

Reakcja akrosomalna

Gdy plemniki dotrą w pobliże komórki jajowej, w kontakcie z otaczającymi ją komórkami wieńca promienistego uwalniają zawartość **akrosomu**. Zawarte w nim enzymy trawią połączenia między komórkami wieńca promienistego oraz osłonkę przejrzystą. Odsłania to samą komórkę jajową i umożliwia fuzję błon plemnika i komórki jajowej. Do wnętrza komórki jajowej wnika tylko jądro plemnika – pozostałe elementy, czyli wstawka zawierająca mitochondria i witka, pozostają poza komórką.

:: Ciekawostka

Plemniki w śluzie szyjkowym przemieszczają się dzięki oddziaływaniom elektrostatycznym, a zatem tylko żywe plemniki są transportowane w ten sposób. Tylko błona żywej komórki jest w stanie utrzymać stan niewielkiego spolaryzowania potrzebny do zadziałania mechanizmów elektrostatycznych.



60.6. Reakcja akrosomalna jest pierwszym etapem wnikania plemnika do komórki jajowej.

? Dlaczego mitochondrialny DNA dziedziczymy wyłącznie po matce?

Reakcja korowa

Wniknięcie jądra plemnika do komórki jajowej rozpoczyna reakcję korową, mającą za zadanie zabezpieczenie komórki jajowej przed wnikaniem do niej kolejnych plemników. Pod błoną komórki jajowej znajdują się liczne pęcherzyki, których zawartość zostaje wyrzucona na zewnątrz. Tworzy się bariera, która nie pozwala następnym plemnikom połączyć się z błoną komórki jajowej. Poza zapoczątkowaniem reakcji korowej, kontakt błon gamet powoduje też zakończenie w komórce jajowej drugiego podziału mejotycznego (zatrzymanego przed zapłodnieniem). Równocześnie jądro komórkowe plemnika, któremu udało się wniknąć do wnętrza komórki jajowej, przemieszcza się w kierunku jej jądra. Dochodzi do fuzji jąder komórki jajowej i plemnika, co kończy etap zapłodnienia komórki jajowej. Powstająca **diploidalna zygota** jest pierwszą komórką nowego organizmu.

PODSUMOWANIE

- Cykl menstruacyjny u kobiety trwa około 28 dni i jest sterowany przez hormony gonadotropowe przysadki mózgowej.
- Proces powstawania komórki jajowej obejmuje podział mejotyczny, który rozpoczyna się już w fazie płodowej, a kończy się dopiero w momencie zapłodnienia.
- W trakcie każdego cyklu miesięcznego dojrzewa tylko jeden pęcherzyk jajnikowy (pęcherzyk Graafa) około 14 dnia cyklu. Z niego w chwili owulacji uwalnia się jedna niedojrzała komórka jajowa.
- Po uwolnieniu komórki jajowej pozostałość pęcherzyka Graafa przekształca się w produkujące progesteron ciałko żółte.
- Jeśli nie dojdzie do zapłodnienia, ciałko żółte produkuje progesteron przez mniej więcej 14 dni, po czym zanika (pojawia się menstruacja).
- Jeśli dojdzie do zapłodnienia, ciałko żółte produkuje progesteron aż do 4. miesiąca ciąży.
- Od początku 5. miesiąca ciąży zadanie produkcji progesteronu przechodzi na łożysko, w pełni już wówczas wykształcone.
- Kluczową rolę w przebiegu cyklu miesiączkowego odgrywają przysadkowe hormony: FSH stymulujący dojrzewanie pęcherzyków oraz LH inicjujący uwolnienie komórki jajowej (owulację).
- Progesteron umożliwia implantację zapłodnionej komórki jajowej, hamuje nadmierny rozrost endometrium oraz zmniejsza wrażliwość macicy na oksytocynę.
- Estrogeny wpływają w okresie dojrzewania na rozwój typowo kobiecych cech płciowych, a w czasie cyklu miesięcznego odpowiadają za rozrost śluzówki macicy.
- Ruch plemników w drogach rodnych nie zawsze ma charakter aktywny, przemieszczają się one również biernie, co pozwala zaoszczędzić energię.
- Wnikanie plemnika do komórki jajowej polega na reakcji akrosomalnej, czyli na uwolnieniu enzymów z przedniej części główki plemnika.
- Reakcja korowa zabezpiecza przed wnikaniem więcej niż jednego plemnika do komórki jajowej.

ZADANIA

1. Omów procesy zachodzące w trakcie dojrzewania pęcherzyka jajnikowego.
2. Scharakteryzuj przemieszczanie się plemników w drogach rodnych.
3. Przedstaw rolę hormonów przysadkowych FSH i LH w regulacji cyklu miesięcznego.
4. Scharakteryzuj przebieg reakcji akrosomalnej i korowej.
5. Porównaj funkcję progesteronu i estradiolu w cyklu miesięcznym.

W INTERNECIE

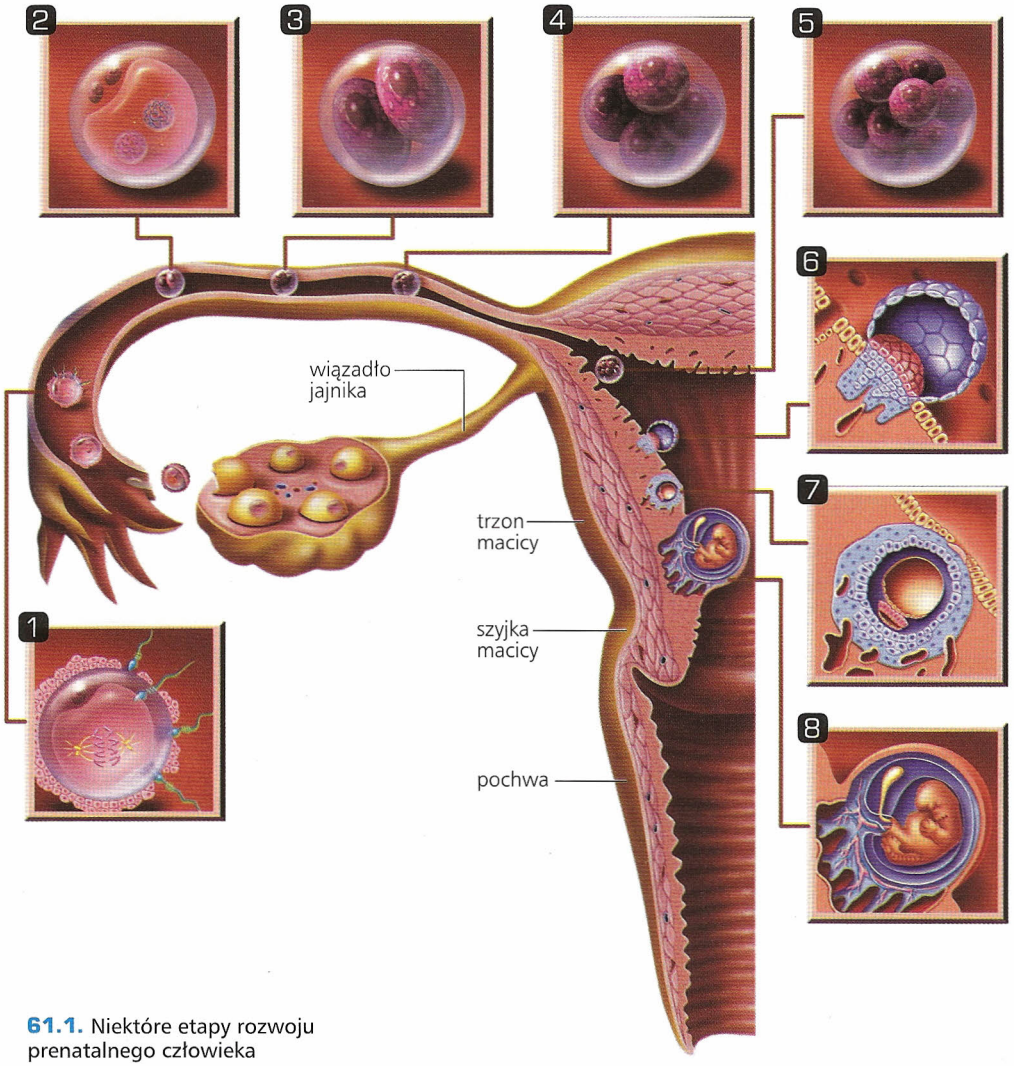
- http://www.invitro-24.pl/
- http://babyonline.pl/ciaza_i_porod_ciaza_artykul,1046.html

61. Fazy rozwoju zarodka i płodu

Dojrzały organizm człowieka składa się z około 100 bilionów komórek. Wszystkie one powstają z jednej wyjściowej komórki nazywanej **zygotą**, która powstaje w wyniku połączenia się dwóch gamet: męskiej (plemnika) i żeńskiej (komórki jajowej). Od chwili zapłodnienia rozpoczyna się etap życia nazywanego wewnątrzmacicznym. Tuż po zapłodnieniu dzieląca się zygota przepływa jajowodem w kierunku macicy. Po 8–10 dniach wędrówki **zarodek** wszczepia się w śluzówkę macicy. Długość rozwoju wewnątrzmacicznego u człowieka trwa przeciętnie 10 miesięcy księżycowych (40 tygodni, czyli 280 dni), licząc od ostatniej menstruacji poprzedzającej ciążę.

Rozwój zarodkowy człowieka

Okres ten rozpoczyna się w momencie połączenia komórki jajowej z plemnikiem, do czego dochodzi w jajowodzie **(61.1.)** (1). W pierwszym etapie bruzdkująca (dokonująca podziałów) **zygota** przemieszcza się jajowodem w kierunku macicy (2–5). Mimo licznych podziałów



61.1. Niektóre etapy rozwoju prenatalnego człowieka

mitotycznych wielkość zarodka się nie zmienia. Po 10 dniach proces bruzdkowania zostaje zakończony, a powstały zarodek nosi nazwę **moruli** (5). Tempo podziałów moruli spada, powiększają się za to przestrzenie międzykomórkowe i wewnątrz **zarodka** powstaje jama wypełniona płynem. Zarodek osiąga w ten sposób stadium **blastocysty** (rodzaj blastuli). Ma ona postać pęcherzyka zbudowanego z dwóch warstw komórek – zewnętrznej o większych komórkach, czyli **trofoblastu**, i wewnętrznej – **embrioblastu**. Po mniej więcej 12 dniach wędrówki jajo płodowe dostaje się ostatecznie do macicy, gdzie się zagnieżdża przy udziale enzymów wydzielanych przez trofoblast. Etap ten nosi nazwę **implantacji** (6). Zagnieżdżony zarodek obrasta błona śluzowa macicy. Trofoblast powoli zrasta się z macicą i przekształca się w kosmówkę.

Około 12. dnia rozwoju zarodkowego rozpoczyna się proces **gastrulacji** (7), w wyniku którego wytwarzają się trzy **listki zarodkowe**: ektoderma, mezoderma oraz endoderma. Dają one początek wszystkim narządom i strukturom ciała.

W kolejnym etapie powstają **błony płodowe**, czyli owodnia, omocznia oraz kosmówka (8). **Owodnia** jest wypełniona płynem, który zapewnia odpowiednie środowisko dla rozwoju zarodka. **Kosmówka** otacza ciało zarodka i pozostałe błony płodowe. **Omocznia** rozwija się ze ścian prajelita i tworzy wraz z otaczającymi tkankami pępowinę łączącą początkowo zarodek, a potem – płód z łożyskiem i tym samym z matką. Wewnątrz pępowiny przebiegają duże naczynia krwionośne doprowadzające krew płodu do łożyska i z łożyska do płodu. Samo **łożysko** jest współtworzone przez kosmówkę oraz ścianę macicy i spełnia różnorodne funkcje:

- umożliwia wymianę gazową między płodem a matką (krew matki i płodu się nie miesza)
- pozwala na przekazywanie do płodu substancji odżywczych i przeciwciał oraz usuwanie z niego produktów przemiany materii do krwiobiegu matki
- produkuje hormony (np. progesteron i estrogen)
- ochrania płód przed mikroorganizmami krążącymi we krwi matki.

Począwszy od 4. tygodnia, w zarodku następują zmiany, które prowadzą do powstania zawiązków kończyn, głowy z łukami skrzelowymi, oczu, uszu, układu pokarmowego i innych. Po trzech tygodniach (ok. 24. dnia) rozpoczyna pracę serce, pompujące krew w układzie krwionośnym zarodka mierzącego wówczas zaledwie 5 mm i ważącego 0,02 g. Około 30. dnia pojawiają się zawiązki kończyn górnych i dolnych, a w 40. dniu funkcjonuje już mózg i układ nerwowy. Zarodkowy etap rozwoju zostaje zakończony około 8. tygodnia. Zarodek mierzy na tym etapie blisko 25 mm, waży 1,2 grama i ma dobrze rozwinięte zawiązki wszystkich organów.

POWSTAWANIE LISTKÓW ZARODKOWYCH

Z mezodermy powstają:

- wszystkie rodzaje tkanki łącznej
- prawie wszystkie rodzaje mięśni
- układ krążenia, układ limfatyczny
- nerki i narządy płciowe

Z endodermy powstają:

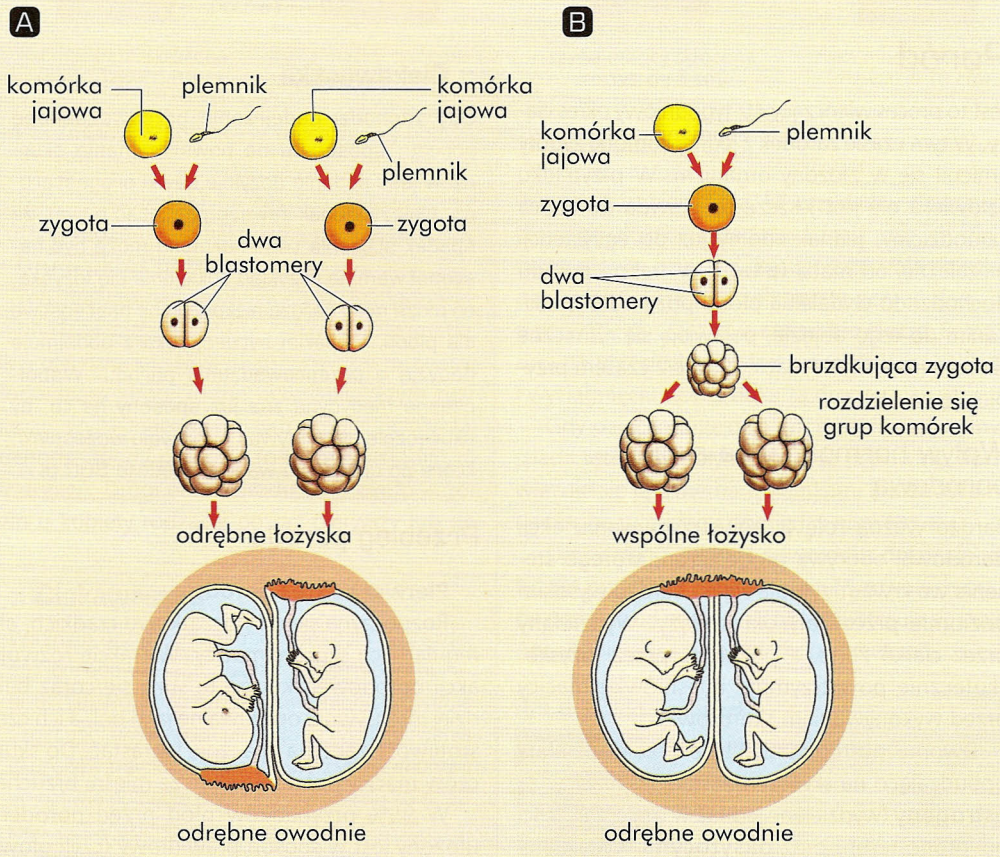
- nabłonek przewodu pokarmowego
- gruczoły związane z przewodem pokarmowym (trzustka, wątroba)
- nabłonek układu oddechowego (tchawicy i płuc)
- nabłonek pęcherza moczowego i cewki moczowej

Z ektodermy powstają:

- naskórek i jego pochodne (włosy, paznokcie)
- gruczoły potowe, mleczne i łojowe
- szkliwo zębów
- elementy oczu: rogówka i soczewki, siatkówka
- cały układ nerwowy, a także część nerwowa przysadki

:: Ciekawostka

Mianem ciąży bliźniaczej określamy ciążę mnogą występującą u człowieka i innych ssaków. Bliźnięta poczęte w wyniku równoczesnego zapłodnienia dwóch odrębnych komórek jajowych przez dwa różne plemniki noszą nazwę bliźniąt dwujajowych. Są one połączone z matką za pośrednictwem odrębnego łożyska i posiadają odmienny genotyp (A). Jeśli natomiast na wczesnych etapach bruzdkowania pojedynczej zapłodnionej komórki jajowej dojdzie do jej rozdzielenia na dwie niezależne grupy komórek, to każda z nich ulegnie przekształceniu w niezależny płód. W ten sposób powstają tzw. bliźnięta jednojajowe. Charakteryzują się one identycznym genotypem oraz są połączone z matką za pośrednictwem wspólnego łożyska (B).

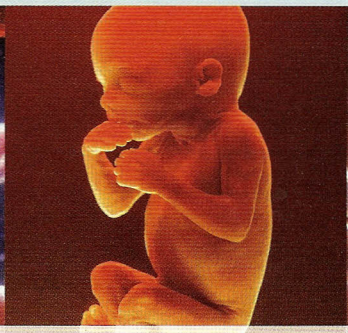


Rozwój płodowy

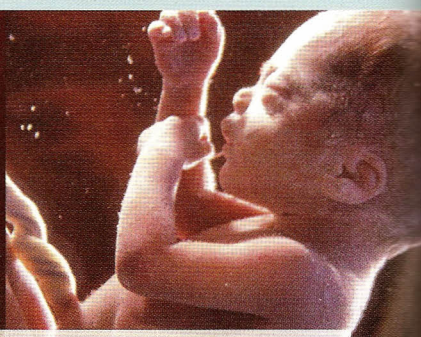
Około 12. tygodnia życia płodowego **(61.2.)** łożysko jest już w pełni rozwinięte, a morfogeneza części ciała i narządów organizmu – niemal zakończona. Od tego momentu następuje intensywny wzrost wielkości i masy **płodu**. Od 16. tygodnia ciąży matka zaczyna odczuwać delikatne ruchy dziecka, które z czasem stają się bardziej energiczne. W 4. miesiącu płód waży już 310 g, mierzy 160 mm, a jego twarz zaczyna przypominać ludzką. W 20. tygodniu zaczynają wyrastać włosy oraz paznokcie. Całe ciało pokrywa delikatny meszek płodowy nazywany lanugo, który zanika tuż przed narodzinami. W swoim środowisku wodnym płód wykonuje bardzo intensywne ruchy, około 5. miesiąca **(61.3.)** zaczyna ssać kciuk, a po 6. miesiącu wykształca się u niego bezwarunkowy odruch chwytania charakterystyczny dla noworodków.



61.2. Zarodek 12-tygodniowy



61.3. Płód 5-miesięczny



61.4. Płód 8-miesięczny

Poród

Jest to proces wieńczący 40-tygodniowy okres ciąży. W tym czasie zarodek z jednej komórki zygoty zmienił się w złożony organizm. W przypadku człowieka nie jest jeszcze co prawda do końca samodzielny, jednak zdolny już do egzystencji niezależnej od matki **(61.4.)**. W trakcie porodu dochodzi do wydalenia płodu poza ciało matki. Zanim do tego dojdzie, pojawiają się rytmiczne skurcze mięśniówki macicy, które z czasem przybierają na sile.

Wpływ hormonów na akcję porodową

Bardzo ważną rolę w powstrzymywaniu akcji porodowej odgrywa progesteron, którego stężenie we krwi utrzymuje się na bardzo wysokim poziomie przez cały okres ciąży. Wydzielany przez ciałko żółte, a później – przez łożysko, skutecznie powstrzymuje mięśniówkę macicy przed wykonywaniem skurczów.

Dwoma hormonami, które z kolei działają pobudzająco na skurcze mięśniówki macicy, są **estrogeny** (wydzielane jednak w mniejszej ilości niż progesteron) oraz **oksytocyna** wydzielana przez tylny płat przysadki. W czasie ciąży zasób uwalnianych progesteronu i estrogenów rośnie powoli, jednak od 7. miesiąca produkcja estrogenów zaczyna być większa niż progesteronu. Dodatkowo, gdy dziecko osiągnie już właściwą masę, a łożysko – odpowiedni wiek, poziom produkowanego progesteronu zaczyna szybko spadać, co jeszcze bardziej zwiększa dysproporcje między hormonami. Rosnące stężenie oksytocyny przesądza sprawę i rozpoczyna się akcja skurczowa, której malejący poziom progesteronu nie jest już w stanie powstrzymać.

:: Ciekawostka

Gdy zachodzi podejrzenie przedwczesnego porodu, sposobem na powstrzymanie skurczów jest podanie dożylnie dawki progesteronu. Należy jednak zawsze pamiętać o tym, że spadek stężenia tego hormonu może być następstwem na przykład odklejenia się łożyska, co może mieć bardzo niekorzystne następstwa dla płodu. W takiej sytuacji lekarz podejmuje decyzję o przeprowadzeniu porodu. Współczesna medycyna zna już sposoby na to, by skutecznie utrzymywać przy życiu wcześniaki, które po urodzeniu ważyły zaledwie 800 g!

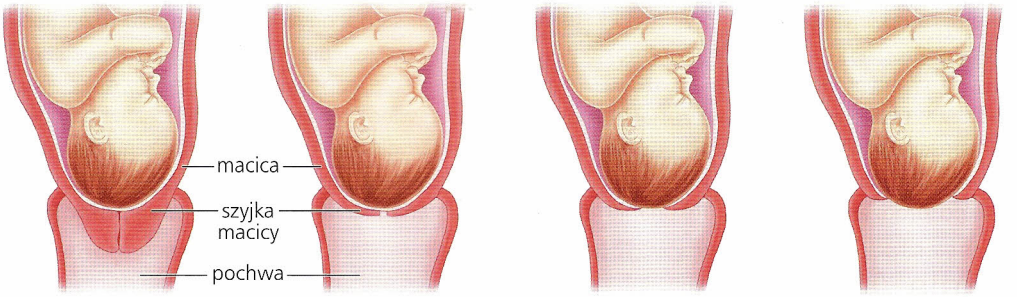
Przebieg porodu

Pierwszy okres porodu

Rozpoczyna się od początkowo rzadkich, ale regularnych skurczy macicy. W trakcie rozwoju akcji porodowej skurcze te stają się coraz bardziej intensywne, odczuwalne jako ból, a ich częstotliwość zaczyna znacznie wzrastać. Do skurczów macicy dołączają skurcze mięśni brzucha.

W 95% przypadków płód przed porodem ułożony jest w sposób prawidłowy (czyli głową w kierunku kanału rodnego). Pierwszą przeszkodą, jaką musi pokonać głowa wydalanego płodu, jest szyjka macicy. Pod koniec ciąży ulega ona rozpulchnieniu, przez co staje się bardziej rozciągliwa. W trakcie skurczów pręca coraz bardziej w dół główka dziecka powoduje skrócenie i rozszerzenie szyjki macicy. Aby dziecko mogło się przez tę przeszkodę przedostać, rozwarcie musi mieć 10 cm średnicy. Do pełnego rozwarcia dochodzi zwykle 8–24 godziny od pierwszych skurczów macicy u kobiety rodzącej po raz pierwszy. U kobiet wydających na świat kolejne

? Jaka cecha budowy anatomicznej główki dziecka pomaga w przejściu przez kanał rodny?



szyjka macicy nieskrócona (brak rozwarcia) | szyjka macicy skrócona (rozwarcie 1 cm) | szyjka macicy skrócona (rozwarcie 5 cm) | szyjka macicy skrócona (rozwarcie 10 cm)

61.5. Zmiany zachodzące w szyjce macicy podczas pierwszego etapu porodu

dziecko (wieloródek) proces ten jest znacznie krótszy (może trwać tylko kilka minut) **(61.5.)**.

Drugi okres porodu

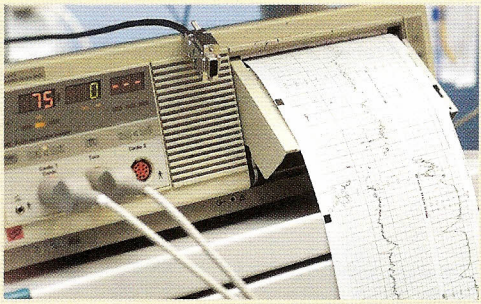
Ten etap jest najbardziej bolesny i jednocześnie najbardziej niebezpieczny zarówno dla matki, jak i dla dziecka. Następuje wówczas przejście płodu przez drogi rodne przy całkowitym rozwarciu szyjki macicy. Na tym etapie zazwyczaj odchodzą wody płodowe (o ile nie nastąpiło to wcześniej). Drugi etap porodu trwa około 2 godzin u kobiety rodzącej po raz pierwszy lub do 30 minut u wieloródki. W przypadku nieprawidłowego ułożenia dziecka w kanale rodnym, zbyt dużej główki dziecka lub owinięcia ciała dziecka pępowiną lekarz położnik może podjąć decyzję o porodzie poprzez tzw. **cesarskie cięcie**. Polega ono na przecięciu powłok skórnych oraz macicy i wyciągnięciu noworodka tą drogą.

Gdy dziecko przejdzie już przez kanał rodny, spada tętno krwi płynącej przez pępowinę. Podwiązuje się ją dwiema tasiemkami lub zaciskami i przecina w miejscu pomiędzy nimi **(61.6.)**.

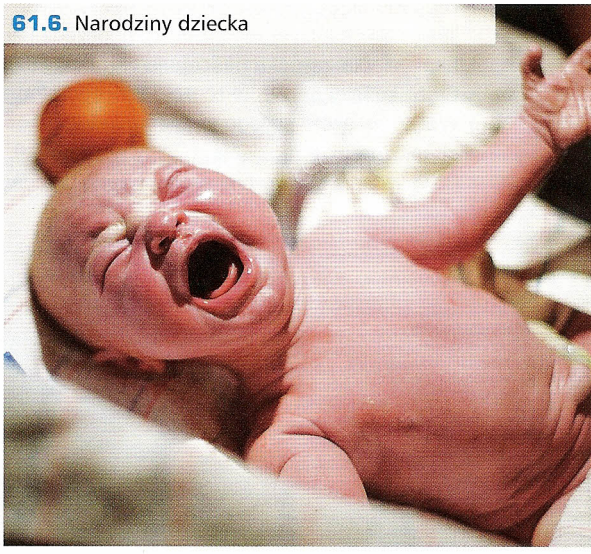
Oceny stanu zdrowia noworodka dokonuje się tuż po przecięciu pępowiny, po 15 minutach oraz po godzinie od porodu. W tym celu stosuje się skalę Apgar opierającą się na pięciu parametrach.

:: Ciekawostka

Ważnym urządzeniem obecnym dziś na każdej sali porodowej jest aparat do kardiotokografii (KTG). Pozwala on na stałe monitorowanie częstości akcji serca płodu oraz występowania skurczów macicy. Wczesne wykrycie zaburzeń umożliwia podjęcie decyzji o wykonaniu na przykład cesarskiego cięcia, gdy tętno płodu zaczęłoby szybko spadać (np. wskutek owinięcia szyi pępowiną).



61.6. Narodziny dziecka



Trzeci okres porodu

Trwa on od momentu urodzenia dziecka do około 1 godziny po porodzie. W tym czasie następuje urodzenie łożyska (matka może stracić wówczas nawet 500 ml krwi). Bardzo ważne jest wówczas ustalenie, czy łożysko zostało urodzone w całości – w innym wypadku mogłoby powodować dodatkowe krwotoki i infekcje. Obecnie tuż po urodzeniu dziecka i dokonaniu szybkiej oceny jego stanu przekazuje się je matce do nakarmienia piersią. Wszystkie niezbędne testy (np. z krwi) są dokonywane na dziecku przytulonym do matki. Jeśli nie występują dodatkowe komplikacje okołoporodowe, matka wraz z dzieckiem po mniej więcej godzinie są przenoszeni na oddział noworodkowy. Okres od ukończenia porodu do całkowitego powrotu narządów rodnych matki do stanu pierwotnego nazywa się **połogiem**.

Skala Apgar

Skala oceny zdrowia noworodka została wprowadzona w 1953 roku przez Virginię Apgar. Według tej skali dziecko może otrzymać maksymalnie 10, a minimalnie 0 punktów. Przyjmuje się, że noworodek w dobrym stanie to taki, który otrzymuje 9–10 pkt w **skali Apgar**. Wartości skali od 0 do 3 mogą świadczyć o ciężkiej zamartwicy noworodka spowodowanej ciężkim porodem i są wskazaniem do podjęcia resuscytacji na sali porodowej.

Skala oceny zdrowia noworodka

	Cecha	Przyznawana liczba punktów		
		0	1	2
A	kolor skóry	sinica całej powierzchni ciała	tułów różowy, sinica kończyn	całe ciało różowe
P	puls	niewyczuwalny	<100/min	>100/min
G	reakcja na bodźce, np. w wyniku wprowadzenia cewnika do nosa	brak	grymas na twarzy	kichanie lub kaszel
A	napięcie mięśni	wiotkość i brak napięcia	słabe napięcie, zgięte kończyny	prawidłowe napięcie, samodzielne ruchy
R	oddychanie	brak oddechu	oddech wolny, ale nieregularny	głośny płacz

PODSUMOWANIE

- Długość ciąży to 10 miesięcy księżycowych (28-dniowych), czyli 40 tygodni (280 dni), licząc od ostatniej menstruacji poprzedzającej ciążę.
- Implantacja zarodka następuje w macicy około 12 dni po zapłodnieniu.
- Ciążę kończy poród, w trakcie którego płód zostaje wydalony poza ciało matki.
- Wpływ na akcję porodową mają zarówno hormony (progesteron, oksytocyna), jak i bodźce mechaniczne (rozciągnięcie macicy przez płód).
- Powszechnie stosowaną skalą służącą do oceny stanu noworodka jest 10-punktowa skala Apgar.

ZADANIA

1. Wyjaśnij, dlaczego najbardziej krytycznym okresem w przebiegu ciąży jest jej pierwszy trymestr (3 pierwsze miesiące).
2. Scharakteryzuj wpływ hormonów na rozpoczęcie akcji porodowej.
3. Omów trzy okresy porodu.
4. Scharakteryzuj znaczenie skali Apgar.

BIBLIOGRAFIA

- Bartel H., *Embriologia medyczna ilustrowany podręcznik*, Wydawnictwo Lekarskie PZWL, 2009.

62. Ontogeneza człowieka

Rozwój osobniczy człowieka obejmuje te same główne etapy, które wyróżniamy w ontogenezie ssaków. Cechą charakterystyczną ontogenezy człowieka jest bardzo długi okres dzieciństwa, który obejmuje nawet 1/6 życia osobniczego człowieka. Poszczególnym fazom ontogenezy towarzyszą również znaczące przemiany psychiczne.

Etapy ontogenezy człowieka

Ontogenezą nazywamy zespół ściśle powiązanych przemian morfologicznych, biochemicznych, fizjologicznych i psychicznych, które kształtują organizm człowieka od poczęcia aż do naturalnej śmierci. W ontogenezie człowieka możemy wyróżnić następujące fazy:

1. Rozwój zarodkowy (do 3 miesięcy)
2. Rozwój płodowy (6–9 miesięcy)
3. Narodziny
4. Okres noworodkowy (pierwsze 28 dni)
5. Wiek niemowlęcy (do 1. roku)
6. Dzieciństwo (1–3 lata)
7. Okres przedszkolny (3–6 lat)
8. Okres szkolny (6–16 lat)
9. Okres młodzieńczy (16–18 lat)
10. Okres dojrzałości (19–60 lat)
11. Okres starzenia się (powyżej 60. roku życia)
12. Śmierć

Pierwsze cztery fazy ontogenezy człowieka, czyli rozwój zarodkowy i płodowy, zostały omówione wcześniej. Zwieńczeniem etapu zwanego embriogenezą jest moment przyjścia dziecka na świat. W tym momencie rozpoczyna się **okres noworodkowy**, w którym dziecko styka się z całkowicie odmiennym środowiskiem.

Okres noworodkowy

Okres noworodkowy trwa do ukończenia przez dziecko 28 dni **(62.1.)**. Prawidłowa waga noworodka urodzonego o właściwym czasie waha się w granicach od 2,5 do 4,5 kg, a długość ciała – od 50 do 62 cm. Już od pierwszych chwil po urodzeniu noworodek zaczyna się bardzo intensywnie odżywiać i gwałtownie rośnie. Charakterystyczne dla noworodka są inne niż u dorosłego proporcje budowy ciała: duża głowa, krótka szyja, długi tułów i krótkie kończyny. Okres noworodkowy jest najcięższym etapem życia człowieka. Przejście od życia płodowego, gdzie wszystkie potrzeby organizmu były zaspokajane przez organizm matki, do życia samodzielnego wiążą się z koniecznością uruchomienia samodzielnych mechanizmów: oddychania, krążenia, wydalania, trawienia, regulacji temperatury itp. Jest to adaptacja noworodka do środowiska. Ruchy dziecka są intensywne, lecz jeszcze chaotyczne i nieskoordynowane. Początkowo noworodek śpi około 21 godzin na dobę, budząc się jedynie w porach karmienia. W tym okresie charakterystyczne są odruchy chwytne i ssania, po około 2 tygodniach dziecko zaczyna rozpoznawać głosy bliskich.

:: Ciekawostka

W pierwszych dniach życia noworodka masa jego ciała zwykle zmniejsza się o około 10% masy urodzeniowej.



62.1. W 1. miesiącu życia następuje adaptacja noworodka do nowego środowiska.



62.2. Dziecko przed ukończeniem 1. roku życia staje się coraz bardziej aktywne.

? Na jakie zagrożenia jest narażony noworodek po narodzinach?



62.3. Pod koniec okresu dziecięcego ustala się pełna liczba zębów mlecznych.



62.4. Koordynacja ruchów potrzebna do opanowania umiejętności samodzielnej jazdy konnej nie jest problemem dla sześciolatka.

Okres niemowlęcy

Trwa od zakończenia etapu noworodkowego do ukończenia przez dziecko 1. roku życia **(62.2.)**. Na ten okres życia przypada zdumiewający wzrost i rozwój. Niemowlę jest bardzo wrażliwe na bodźce ze świata zewnętrznego. Bardzo ważne jest prawidłowe żywienie, gdyż szczególnie teraz zagrażają dziecku choroby wynikające z niedoboru witaminy D_3 (krzywica) czy żelaza (niedokrwistość). Najodpowiedniejszy dla niemowlęcia jest pokarm matki. Jest on sterylny i zawiera wszystkie składniki niezbędne w procesach odporności. Karmienie piersią jest również okresem wytwarzania intymnej więzi pomiędzy dzieckiem a matką. Początkowo dziecko nie ma zbyt dużego kontaktu z otoczeniem, nie rozumie ludzkiej mowy ani samo nie mówi. Pod koniec 1. roku życia udaje mu się osiągnąć spionizowaną postawę ciała. To daje możliwość nauki manipulacji rękami. Lokomocja odbywa się początkowo jako raczkowanie „na czworakach", jednak już mniej więcej w 12. miesiącu życia niemowlę powinno stać i chodzić. Pod koniec okresu niemowlęcego dziecko osiąga zdolność emocjonalnego reagowania na osoby bliskie, przede wszystkim na matkę. W tym właśnie okresie kształtują się zasadnicze elementy rozwoju uczuciowego. W rozwoju dziecka do pokonywania różnorodnych trudności bardzo ważny jest przykład brany z dorosłego – bez niego dziecko nie nauczy się chodzić, mówić ani rozumieć ludzkiej mowy. Dlatego ten okres jest szczególnie ważny i wymaga wiele troski i starań ze strony obojga rodziców.

Okres dzieciństwa

Okres ten obejmuje 2. i 3. rok życia **(62.3.)**. Spowalnia się tempo wzrostu, spada zapotrzebowanie na pokarm, znika podskórna tkanka tłuszczowa, więc dziecko staje się szczuplejsze. Doskonali też w tym okresie motorykę i zdolności mówienia, dzięki czemu staje się bardziej samodzielne w poznawaniu otoczenia. Dzieci w tej fazie rozwoju cechują się olbrzymim zapotrzebowaniem na ruch. W związku z tym źle znoszą monotonne zajęcia. Jednak zwiększona aktywność ruchowa to także wiele urazów u dziecka. Ponieważ nie ma ono doświadczenia, bez zahamowania dotknie płomienia świecy, nie bacząc na niebezpieczeństwo, lub skoczy ze znacznej wysokości. Pod koniec fazy dziecięctwa maluch zaczyna stawiać pytania typu „co to jest?", potrafi również opanować świadome oddawanie moczu i kału (koniec korzystania z pieluszek). Uzębienie mleczne ustala się w pełnym zakresie (20 zębów), dzięki czemu zmienia się sposób żywienia dziecka, które coraz bardziej przechodzi z pokarmów płynnych i półpłynnych na pokarmy stałe.

Okres przedszkolny

Trwa do ukończenia przez dziecko 6. roku życia **(62.4.)**. W tym czasie zmienia się sylwetka małego człowieka. Głowa powiększa się nieznacznie, podczas gdy tułów i kończyny wyraźnie się wydłużają. Pod koniec 6. roku życia ciało nabiera cech charakterystycznych dla płci: u chłopców rozrasta się pas barkowy, u dziewcząt pas biodrowy. Wzrasta znacznie sprawność mięśniowa i motoryczna. Ze względu na fakt, że dziecko w tym okresie ma więzadła znacznie słabsze niż dorosły, często występują u dzieci wady postawy (zwłaszcza skrzywienia kręgosłupa). Układy wewnętrzne organizmu (serce, płuca, wątroba, układ pokarmowy) zaczynają funkcjonować jak u człowieka dorosłego. W tym okresie rozpoczyna się też wymiana uzębienia



62.5. Okres szkolny



62.6. Okres młodzieńczy

z mlecznego na stałe. Prawidłowo rozwijające się dziecko we wczesnym wieku przedszkolnym powinno posiadać zdolność koordynacji ruchów, dla sześciolatka nie stanowi problemu nauka jazdy konnej czy jazdy na rowerze.

Dynamikę rozwoju psychicznego dzieci w wieku przedszkolnym charakteryzują dalekie zmiany w sferze społecznej i emocjonalnej. Chłopcy i dziewczynki w tym wieku stają się dociekliwi, rozwijają swoja wyobraźnię i zdolności fantazjowania, czyli myślenia abstrakcyjnego, ujawniają się też ich zdolności plastyczne. Dziecko w wieku przedszkolnym często okazuje dumę z osiągniętego celu, potrafi konkurować w grupie. Może również wykazywać objawy zazdrości, niekiedy wręcz agresji i egocentryzmu, szczególnie gdy w domu jest młodsze rodzeństwo. Typowe dla dzieci w tym okresie są sformułowania „ja, dla mnie, moje".

Okres szkolny

Trwa od około 6. do 16. roku życia **(62.5.)**. Wtedy młody człowiek uzyskuje pełną świadomość własnej osoby i odrębności. Zaczyna przejawiać cechy indywidualistyczne. Cały czas doskonali umiejętności kontaktowania się z otoczeniem i sprawowania nad nim kontroli. Oprócz intensywnego rozwoju fizycznego następuje również bardzo szybki rozwój intelektualny. Dziecko panuje nad swoimi odruchami i potrafi przewidywać skutki swojego postępowania. W czasie poprzedzającym okres pokwitania kształtują się postawy i zachowania seksualne oraz postawy wobec reprodukcji i możliwości zakładania rodziny. Pojawiają się przejawy buntu, młody człowiek często stara się postępować wbrew przyjętym normom. Poszukuje też poparcia i akceptacji innych (zwłaszcza osób bliskich). Typowym i widocznym objawem dojrzewania dziewczynek jest pierwsza miesiączka, nieoznaczająca jednak pełnej dojrzałości rozrodczej. U chłopców pojawiają się pierwszy wytrysk nasienia i polucje, czyli zmazy nocne. Dzieci zaczynają przejmować się swoim wyglądem. Dziewczynki wstydzą się piersi, a chłopcy – trądziku i mutacji głosu.

Okres młodzieńczy

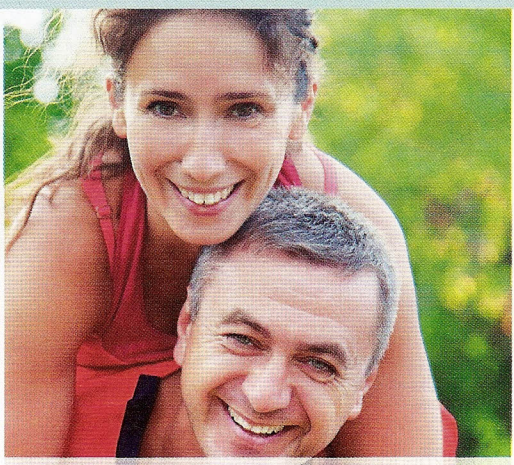
Obejmuje okres pomiędzy 16. a 18. rokiem życia **(62.6.)**, w którym dziecko, a właściwie młody dorosły, osiąga okres stabilizacji i harmonii. Nie oznacza to jednak zakończenia rozwoju fizycznego i psychicznego. Okres młodzieńczy rozpoczyna się wraz z dojrzewaniem funkcji rozrodczych i kończy z chwilą osiągnięcia pełnej zdolności rozrodczej. W tym czasie młodzi ludzie uczą się nawiązywania i utrzymywania więzi w grupie rówieśniczej, wciąż uzyskują niezależność psychologiczną i ekonomiczną oraz planują swoją przyszłość zawodową.

Okres dojrzałości

Jest to najdłuższy okres życia człowieka (trwający od 19. do 60. roku życia) **(62.7.)**, będący zwieńczeniem całego procesu rozwoju dziecka. Pod względem fizycznym i psychicznym organizm osoby dorosłej jest już w pełni rozwinięty, wszystkie jego narządy i układy pracują z optymalną wydajnością. W sferze fizycznej osiągnięcie dorosłości następuje wcześniej (pełnia sił fizycznych i zdolność do prokreacji). Dojrzałość psychiczna jednak jest bardziej złożona i obejmuje: akceptację siebie jako osoby, ustalenie odpowiedniej hierarchii wartości, obiektywność w działaniu i samokontrolę. Ten etap życia dzieli się często na: okres dojrzałości (19–40) i okres wieku średniego (40–60).

Okres starzenia się

Starzenie się to ostatni etap życia człowieka, jednak postępuje przez cały czas. Gdy jesteśmy dziećmi, starzenie się traktujemy w wymiarze pozytywnym, przybliża nas bowiem do świata dorosłych. W wieku dojrzałym perspektywa starości i związanych z nią problemów zaczyna oraz bardziej działać depresyjnie na człowieka. Współcześnie okres starości rozpoczyna się po około 60. roku życia **(62.8.)**. Zaznacza się w nim przewaga procesów katabolicznych nad anabolicznymi, przez co rozpoczyna się i postępuje stopniowa degradacja tkanek i narządów. Wpływa to nie tylko na zdolności poznawcze organizmu, lecz także na jego kontakt z otoczeniem. Starzenie się jest jednak procesem bardzo indywidualnym.



62.7. Okres dojrzałości

Śmierć

Śmierć stanowi ostatni etap ontogenezy. Zgodnie z definicją medyczną śmierć jest stanem ustania oznak życia, spowodowanym niemożliwym do uregulowania zachwianiem równowagi wewnętrznej ustroju.



62.8. Okres starzenia się

PODSUMOWANIE

- Ontogeneza to wiele przemian, które kształtują organizm człowieka od poczęcia aż do naturalnej śmierci.
- Pierwsza faza ontogenezy po narodzinach to okres noworodkowy.
- Do ukończenia 1. roku życia trwa okres niemowlęcy.
- Po okresie niemowlęcym nadchodzi faza dziecięctwa, obejmująca 2. i 3. rok życia.
- Od ukończenia 3 lat człowiek wkracza w okres przedszkolny.
- Okres szkolny jest najdłuższym okresem w życiu młodego człowieka, bo obejmuje czas około 10 lat: od 6. do 16. roku życia.
- Okres młodzieńczy (16.–18. rok życia) to koniec rozwoju fizycznego i psychicznego, połączony z osiągnięciem pełnej zdolności rozrodczej.
- Najdłużej trwającą fazą w życiu człowieka jest okres dojrzałości, przypadający na wiek 19–60 lat.
- Ostatnim okresem życia jest starość kończąca się śmiercią, czyli ustaniem wszystkich procesów życiowych, a tym samym całej ontogenezy człowieka.

ZADANIA

1. Omów, na jakim etapie rozwoju dochodzi do pełnego wykształcenia uzębienia mlecznego u dzieci.
2. Scharakteryzuj zmiany zachodzące w wieku przedszkolnym i szkolnym.
3. Porównaj okres dojrzałości z okresem starzenia się.

BIBLIOGRAFIA

- Wolański N., *Rozwój biologiczny człowieka*, PWN, 2012.

63. Planowanie rodziny

Pojęcie **planowania rodziny** obejmuje całokształt zagadnień z dziedziny biologii, psychologii, wychowania i ekonomii, związanych z założeniem i funkcjonowaniem rodziny. We współczesnym społeczeństwie planowanie rodziny obejmuje głównie dwie sfery: zapobieganie niechcianej ciąży oraz poradnictwo medyczne w sytuacjach zaburzeń płodności u kobiety lub mężczyzny.

Metody antykoncepcyjne

Mianem antykoncepcji określa się wszelkie metody i zachowania kontrolujące narodziny poprzez zapobieganie zapłodnieniu i zajściu w ciążę. Możliwe jest stworzenie wielu kategorii opisujących metody antykoncepcji. Niżej omówiono najważniejsze z nich.

Metody utrudniające poczęcie

Należą tutaj wszystkie metody zmniejszające prawdopodobieństwo zapłodnienia, w związku z czym ich stosowanie nie wiąże się z niszczeniem już powstałych embrionów. Do tej grupy zalicza się wiele sposobów: **naturalnych**, **sztucznych** czy **chirurgicznych**.

Naturalne planowanie rodziny

Jest to grupa metod, dzięki którym można prawidłowo przewidzieć okresy płodne na podstawie pomiaru lub obserwacji fizjologicznych przemian zachodzących w czasie różnych faz cyklu miesiączkowego. Naturalne metody planowania rodziny obejmują trzy podgrupy.

Metoda Billingsów

Ta metoda polega na obserwacji śluzu wydzielanego przez nabłonek szyjki macicy. Pojawia się on w dniach poprzedzających owulację i ma kluczowe znaczenie dla poczęcia dziecka. Odpowiada bowiem za transport plemników z pochwy w kierunku macicy. Metoda ta wymaga badania przez kobietę konsystencji śluzu szyjki macicy (nie pochwy). W okresie poprzedzającym owulację śluz jest lepki i kleisty (przypomina konsystencją świeże białko jaja kurzego). Według badań przeprowadzonych na grupie ochotników stosujących tę metodę jej skuteczność oceniono na 78% (co oznacza, że na 100 par stosujących metodę 22 pary poczęły dziecko).

Metody objawowo-termiczne

Wszystkie stosowane tutaj metody (istnieje wiele odmian) obejmują codzienne pomiary temperatury ciała **(63.1.)**. Na tej podstawie można z pewnym prawdopodobieństwem przewidzieć pojawienie się okresu niepłodności poowulacyjnej, czyli momentu, w którym komórka jajowa degeneruje i nie jest już zdolna do zapłodnienia (następuje to w ciągu 48 godzin po owulacji). Stosowanie

63.1. Precyzyjny pomiar temperatury pozwala określić moment owulacji.

? W jakich sytuacjach może dojść do zafałszowania wyników badania termicznego?



metody termicznej wymaga dużej skrupulatności i dyscypliny w prowadzeniu pomiarów oraz dokładnego sprzętu. Przyjmuje się, że sygnałem informującym o owulacji jest podniesienie temperatury o 0,2°C w porównaniu ze średnią z 6 poprzednich dni. O okresie względnej bezpłodności możemy mówić po około 3 dobach od momentu zanotowania podwyższonej temperatury. Często pomiar temperatury łączy się z obserwacją śluzu szyjki macicy (stąd nazwa metody objawowo-termiczne). Skuteczność obu połączonych metod wynosi około 87%. Negatywny wpływ na wynik pomiaru temperatury, a przez to na skuteczność tej metody, mogą mieć różne czynniki środowiska, takie jak infekcje, spożycie alkoholu, stres, zmiana klimatu lub nieregularny tryb życia.

Metoda laktacyjna niepłodności poporodowej (LAM)

Jest to metoda możliwa do zastosowania jedynie przez kobiety tuż po urodzeniu dziecka. Warunkiem jest częste karmienie piersią, co stymuluje przysadkę mózgową do produkcji oksytocyny i prolaktyny hamujących proces owulacji. Przy rzadszym karmieniu metoda ta jest zawodna, ponieważ może występować owulacja.

Metody mechaniczne

Te sposoby polegają na stosowaniu mechanicznych barier zapobiegających wniknięciu nasienia z plemnikami do dróg rodnych kobiety. Metoda mechaniczna jest najczęściej stosowanym sposobem antykoncepcji – wykorzystuje się w tym celu **prezerwatywę** (mężczyźni) lub **kapturek dopochwowy** (kobiety) **(63.2.)**. Zastosowanie tych metod jest szczególnie istotne z epidemiologicznego punktu widzenia, zapobiega bowiem szerzeniu się chorób przenoszonych droga płciową (np. zakażenia wirusem HIV).

Spermicydy

Spermicydy to preparaty niszczące plemniki lub pozbawiające je zdolności do ruchu. Środek chemiczny musi zostać wprowadzony około 10–15 minut przed stosunkiem. Najczęściej ma on postać żelu, pianki, maści lub globulek dopochwowych. Metodę tę można stosować w połączeniu z mechanicznymi metodami antykoncepcyjnymi.

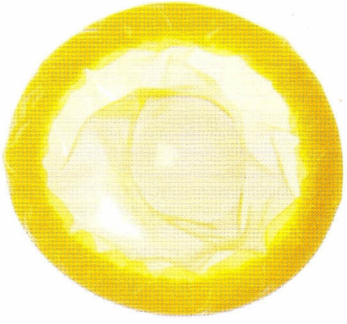
Metody chirurgiczne

Te metody wzbudzają wiele kontrowersji, gdyż polegają na podwiązaniu lub przecięciu jajowodów lub nasieniowodów (w Polsce są poza wyjątkowymi przypadkami nielegalne). Wydaje się, że jest to sposób w 100% skuteczny, jednak i tutaj zanotowano przypadki samoistnego udrożnienia podwiązanych przewodów płciowych.

Stosunek przerywany

Metoda ta polega na wycofaniu penisa z pochwy tuż przed ejakulacją (wytryskiem). Plemniki mogą jednak być obecne również w wydzielinie pojawiającej się przed właściwym wytryskiem nasienia lub pozostać w cewce moczowej po poprzednim stosunku. Poza tym istnieje też niebezpieczeństwo niekontrolowanego wytrysku. W związku z wymienionymi niebezpieczeństwami stosowanie tej metody wiąże się z dużym ryzykiem, że będzie ona nieskuteczna. Ponadto stres związany z kontrolowaniem momentu wytrysku i przerwaniem stosunku może stać się przyczyną nerwic.

? Jakie są zalety i wady stosowania prezerwatyw w porównaniu z innymi metodami antykoncepcyjnymi?



63.2. Prezerwatywy to najpopularniejsza metoda antykoncepcji

Karezza

Inaczej tzw. stosunek powstrzymywany, czyli bez wytrysku. Ma on na celu jak najdłuższe utrzymanie obojga partnerów w stanie bardzo silnego pobudzenia. Metoda ta cechuje się dużą zawodnością, gdyż nie ma gwarancji powstrzymania wytrysku nasienia.

Metody hamujące proces owulacji

Hormonalne tabletki antykoncepcyjne

Stosowanie tabletek zawierających hormony to żeńska metoda antykoncepcyjna wysoce skuteczna w zapobieganiu ciąży (nawet powyżej 99%). Zadaniem hormonów zawartych w pigułkach jest tłumienie funkcji przysadki mózgowej, co w konsekwencji prowadzi do zatrzymania procesu dojrzewania komórki jajowej. Nie dochodzi zatem do owulacji. Na skutek przyjmowania pigułek gęstnieje również śluz wydzielany przez szyjkę macicy i utrudnia ruch plemników. Jeśli pomimo tych mechanizmów dojdzie do zapłodnienia, to zawarte w tabletkach hormony utrudniają implantację zarodka w wyniku zmian w endometrium.

Typowe hormonalne tabletki antykoncepcyjne z żeńskimi hormonami płciowymi muszą być stosowane regularnie, aby osiągnąć skuteczność deklarowaną przez producenta. Nieregularne przyjmowanie lub pominięcie tabletki może znacznie zwiększyć szanse na ciążę. Wyróżniamy dwa rodzaje hormonalnych tabletek antykoncepcyjnych:

- **jednoskładnikowe**
- **dwuskładnikowe**.

Tabletki antykoncepcyjne jednoskładnikowe

Jak sama nazwa wskazuje, tabletki zawierają tylko jeden składnik hormonalny będący sztucznym odpowiednikiem **progesteronu** (należy do tzw. gestagenów) **(63.3.)**. Zawierające go środki antykoncepcyjne najczęściej mają postać tabletek (tzw. minipigułka), zastrzyków (powtarzanych co trzy miesiące) oraz plastrów uwalniających hormon przez skórę. Zaletą minipigułki jest łatwość przyjmowania (droga doustna) oraz brak przerwy w stosowaniu (listek zawiera 28 tabletek). Wadą natomiast są pojawiające się niekiedy skutki uboczne (np. zatrzymywanie wody oraz stany depresyjne).

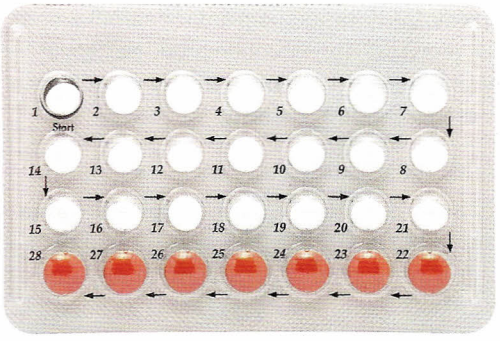
Tabletki antykoncepcyjne dwuskładnikowe

Tabletki antykoncepcyjne dwuskładnikowe zawierają oprócz syntetycznych odpowiedników progesteronu również syntetyczny **estrogen**. Wpływa on dodatkowo na przysadkę mózgową, jeszcze bardziej hamując jej funkcje związane z owulacją. Obecność syntetycznego estrogenu zwiększa poza tym czułość organizmu na odpowiedniki progesteronu i zmniejsza ich stężenie w tabletce przy niezmienionym efekcie antykoncepcyjnym.

W każdym cyklu miesiączkowym kobieta zażywa 21 tabletek (a nie 28 jak w preparatach jednoskładnikowych).

Ze względu na wzajemny stosunek ilości hormonów można wyróżnić trzy typy tabletek dwuskłanikowych. W stosowanych najczęściej preparatach jednofazowych wszystkie tabletki mają jednakowy skład. Preparaty dwufazowe zawierają w opakowaniu dwa rodzaje tabletek o zróżnicowanej ilości syntetycznego odpowiednika progesteronu. Preparaty trzyfazowe zawierają trzy rodzaje tabletek o zmiennej zawartości zarówno odpowiednika progesteronu, jak i syntetycznego estrogenu. Stosuje się je głównie w przypadku rzadko występującej nietolerancji tabletek jednofazowych.

? Wyjaśnij mechanizm antykoncepcyjnego działania preparatów jednoskładnikowych.



63.3. Przykład jednoskładnikowego środka antykoncepcyjnego

:: Ciekawostka

Trwają intensywne prace nad stworzeniem hormonalnych środków antykoncepcyjnych dla mężczyzn. Nastręcza to wiele trudności gdyż polega głównie na hamowaniu wydzielania testosteronu, co może doprowadzić do zjawiska feminizacji (pojawienia się cech kobiecych).

Preparaty utrudniające zagnieżdżenie się zarodka (implantację)

Ta grupa metod antykoncepcyjnych nie wpływa na sam mechanizm poczęcia, utrudnia jednak lub uniemożliwia proces implantacji zarodka bądź też prowadzi do jego obumarcia. Następuje to w efekcie zmian fizjologicznych wywołanych w drogach rodnych kobiety.

Wkładka domaciczna

Jej inna (potoczna) nazwa to **spirala domaciczna** (63.4.). Jest to urządzenie produkowane w bardzo różnorodnych kształtach dopasowanych do kształtu macicy. Już sama jej obecność w macicy powoduje niewielki stan zapalny, co utrudnia implantację zarodka. Dodatkowo wkładki domaciczne mają większą skuteczność dzięki składnikom w nich zastosowanym. Najczęściej jest to miedź, która gromadzi się w śluzie szyjki macicy działając plemnikobójczo. Zmienia też właściwości endometrium. W niektórych wkładkach domacicznych stosuje się progesteron, który jest uwalniany stopniowo i działa jak jednoskładnikowa tabletka antykoncepcyjna. Wkładki z miedzią działają przez około 5 lat, wkładki z progesteronem – około roku.



63.4. Wkładka domaciczna

Hormonalna antykoncepcja postkoitalna

Metoda ta jest nazywana **antykoncepcją ratunkową** i stosują ją kobiety, które odbyły niezabezpieczony stosunek. Środki chemiczne z tej grupy nazywa się również pigułkami dnia następnego (MAP – ang. *morning-after pill*) i może być stosowana do 72 godzin po stosunku. Tabletka zawiera olbrzymią dawkę syntetycznych odpowiedników progesteronu, prowadzących do takiej zmiany w strukturze błony śluzowej macicy, że implantacja zarodka staje się niemożliwa. Stosowanie hormonalnej antykoncepcji postkoitalnej wymaga konsultacji z lekarzem, nie może też być zbyt często wykorzystywana. Jej stosowanie budzi też kontrowersje natury moralnej.

Badania prenatalne

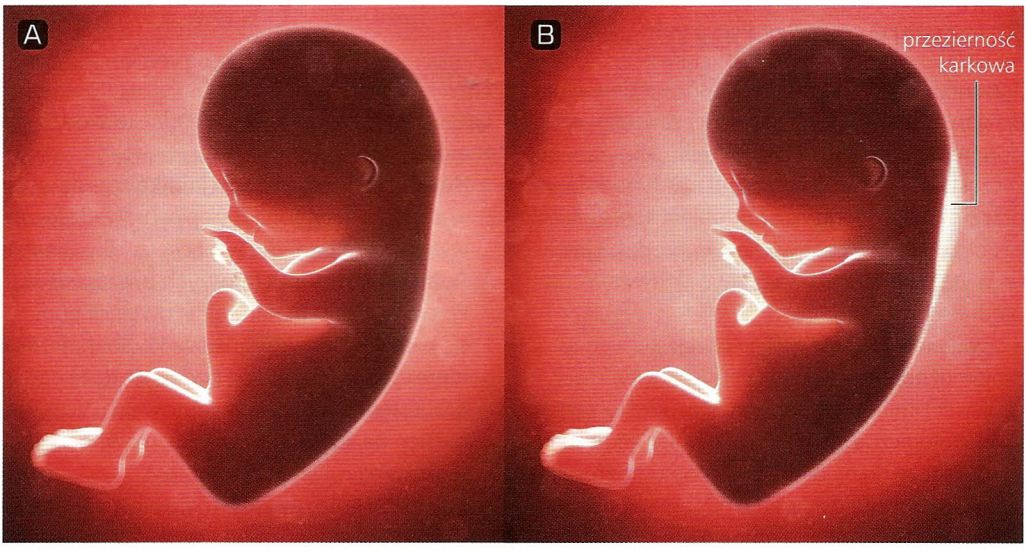
Są to badania wykonywane przez kobietę w trakcie ciąży. Mają one na celu wykluczenie wad rozwojowych lub chorób fizjologicznych o podłożu genetycznym u rozwijającego się płodu, które pojawiają się aż u 2 do 4% wszystkich ciąż. Pod względem stosowanych metod techniki wykonywania badań prenatalnych można podzielić na inwazyjne i nieinwazyjne.

Nieinwazyjne techniki badań prenatalnych

Do tej grupy metod diagnostycznych zaliczamy badania ultrasonograficzne (USG) oraz badanie biochemiczne krwi matki.

Badanie ultrasonograficzne

Najwcześniej badanie ultrasonograficzne może być wykonane między 11. a 14. tygodniem ciąży. Przy użyciu sondy można dokonać oceny anatomii płodu, aby określić jego wielkość, kształt głowy, stopień wykształcenia kończyn i narządów wewnętrznych. Badanie ultrasonograficzne wykorzystuje się również do wykrycia u dziecka między innymi zespołu Downa, Edwardsa lub Turnera. Podstawowym badaniem jest tu pomiar tzw. przeziemności karkowej (63.5.), czyli wypełnionej płynem przestrzeni w rejonie karku płodu. Zwiększenie przeziemności karkowej obserwuje się we wszystkich



63.5. Badanie przezierności karkowej płodu rozwijającego się prawidłowo (A) i nieprawidłowo (B)

wymienionych zespołach, jednak pojawia się ona również w pozbawionych podłoża genetycznego wadach serca, które powodują niewydolność układu krążenia. Dlatego też ewentualny wynik dodatni badania prenatalnego powinien być potwierdzony innymi metodami. Inną obserwacją w czasie badania USG jest określenie widoczności kości nosowej. Jeśli u płodu występuje jeden z wymienionych wyżej zespołów, kość nosowa często pozostaje niewidoczna.

Badanie biochemiczne

Pomiędzy 6. a 14. tygodniem ciąży można wykonać testy biochemiczne pozwalające na wczesne wykrycie wad rozwojowych płodu. Polegają one na sprawdzeniu we krwi przyszłej matki poziomu określonych białek, np. hormonu gonadotropiny kosmówkowej (HCG). Jeśli ich wartości odbiegają od prawidłowych dla danego etapu ciąży, świadczy to o zaburzeniach przebiegu ciąży.

Inwazyjne badania prenatalne

Nieprawidłowy poziom gonadotropiny kosmówkowej przy jednoczesnej podwyższonej przezierności karkowej i braku widocznej kości nosowej powinno zostać potwierdzone metodami inwazyjnymi. Także wiek kobiety jest wskaźnikiem do wykonania tego typu badania (powyżej 35. roku życia). Stosuje się go również u przyszłych matek, w których rodzinie występowały wcześniej wady genetyczne. Przebycie w czasie ciąży infekcji spowodowanej toksoplazmozą lub różyczką jest także wskazaniem do zastosowania tego typu badań.

Jak sama nazwa wskazuje, badania inwazyjne mają większy wpływ na ciążę niż opisane wcześniej badanie ultrasonograficzne i biochemiczne. Mimo nowoczesnych metod diagnostycznych zawsze istnieje ryzyko powikłań, a zaliczamy do nich: zakażenie, krwawienie, przedwczesne odejście wód płodowych i wystąpienie czynności skurczowej macicy oraz w najgorszym wypadku poronienie. Powikłania pojawiają się na szczęście zaledwie w ok. 0,5% wykonywanych badań inwazyjnych. Badania te pozwalają na precyzyjną diagnozę wielu zaburzeń rozwoju płodu.

Stosowane jest wiele różnych typów badań inwazyjnych. Na przykład przy próbie określenia występowania wad genetycznych stosuje się:

- biopsję trofoblastu: badanie polega na pobraniu za pomocą cienkiej igły niewielkiej liczby kosmków trofoblastu; technikę stosuje się pomiędzy 11. a 15. tygodniem ciąży;
- amniopunkcję genetyczną: w zabiegu pobiera się około 20 ml płynu owodniowego poprzez nakłucie powłok brzucha; stosuje się ją między 15. a 20. tygodniem ciąży;
- kordocentezę: zabieg wykonuje się po 20. tygodniu ciąży i polega on na pobraniu igłą krwi z naczyń pępowiny **(63.6.)**.

Problemy par bezpłodnych

Zgodnie z definicją niepłodność w odniesieniu do pary jest stanem niemożności zajścia w ciążę pomimo regularnego współżycia seksualnego z częstotliwością 3–4 stosunków tygodniowo przez okres jednego roku. Problem ten dotyczy w Polsce 10–15% par w wieku reprodukcyjnym.

Wyróżniamy dwa podstawowe rodzaje niepłodności:

- trwałą niemożność zajścia w ciążę
- niemożność donoszenia ciąży.

W leczeniu niepłodności stosuje się środki farmakologiczne stymulujące owulację lub spermatogenezę, zabiegi chirurgiczne udrażniające kanały rozrodcze (jajowody, nasieniowody) oraz wprowadzenie porcji plemników bezpośrednio do macicy.

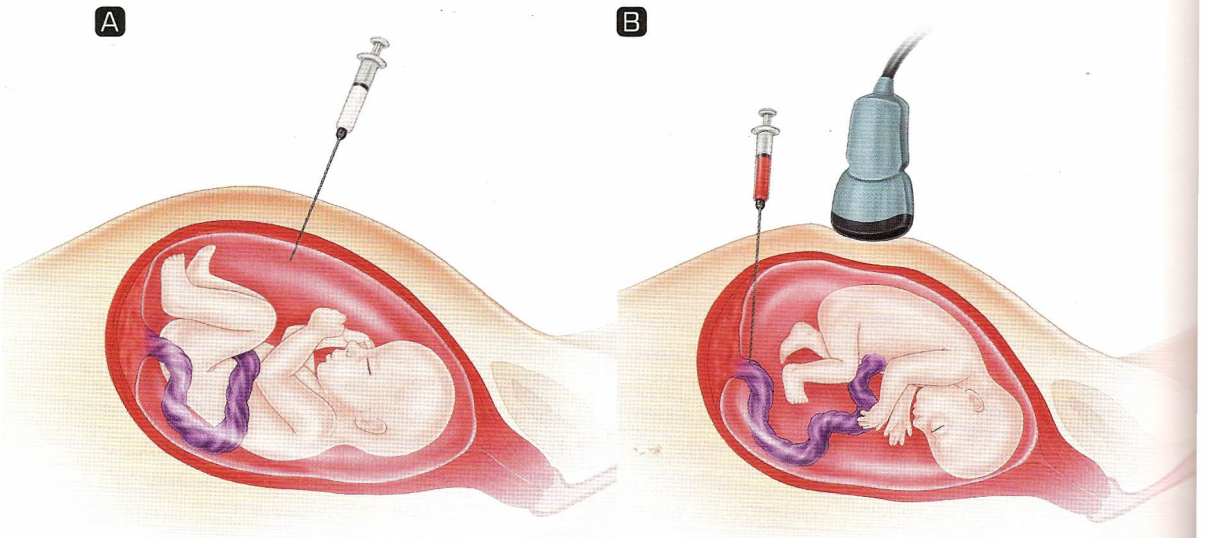
Jeśli powyższe metody zawiodą, możliwe jest również zastosowanie szeregu technik umożliwiających bezpośredni kontakt pomiędzy komórką jajową a plemnikiem. Może to być wstrzyknięcie pojedynczego plemnika bezpośrednio do komórki jajowej, zapłodnienie pobranej od kobiety komórki jajowej w warunkach **in vitro**, a następnie umieszczenie jej w jajowodzie lub jamie macicy albo umieszczenie pobranej wcześniej komórki jajowej razem z plemnikami w jajowodzie, gdzie dochodzi do zapłodnienia.

Technika in vitro

Typowa procedura in vitro składa się z czterech etapów:

1. **Hormonalna stymulacja jajników** za pomocą wysokich dawek gonadotropin, prowadząca do wytworzenia od 5 do 10 pęcherzyków Graafa.
2. **Pobranie komórek jajowych oraz nasienia**. Przed momentem naturalnej owulacji pobiera się komórki jajowe z jajników. Po pobraniu komórek jajowych kobiecie podaje się duże dawki progesteronu celem przygotowania śluzówki macicy na przyjęcie zarodka. Równocześnie mężczyzna oddaje nasienie.
3. **Zapłodnienie pozaustrojowe**. Na jałową szalkę nanosi się komórki jajowe w zawiesinie plemników, a następnie umieszcza się ją w inkubatorze. Do zapłodnienia zwykle dochodzi samoistnie po 20 godzinach. Po kolejnych 2–3 dniach zapłodnione, dzielące się komórki są gotowe do ostatniego etapu.
4. **Embriotransfer**. Za pomocą cewnika zawiesina zarodków zostaje przeniesiona do jajowodu lub bezpośrednio do macicy, gdzie rozpoczyna się proces ich zagnieżdżania w śluzówce. Zagnieżdża się zawsze kilka embrionów, a przez kilka następnych dni kobieta musi przyjmować progesteron, aby ułatwić implantację zarodków. W 15. dniu od wykonania embriotransferu wykonuje się test ciążowy, który potwierdza się w badaniu USG.

63.6. Inwazyjne techniki diagnostyki prenatalnej – amniopunkcja (A) oraz kordocerteza (B)



Diagnostyka preimplantacyjna

Obejmuje metody powiązane ściśle z technikami in vitro i pozwalające na genetyczną analizę komórek jajowych lub zarodków przed dokonaniem embriotranferu. Diagnostykę stosuje się przede wszystkim w grupie pacjentów ze zdiagnozowanym nosicielstwem chorób genetycznych lub w celu wykrycia nieprawidłowej liczby chromosomów (wykluczając tym samym rozwój zarodka np. z zespołem Downa).

Poradnictwo genetyczne

Jest to udzielenie specjalistycznej i profesjonalnej porady parze planującej potomstwo lub rodzinie osoby cierpiącej na chorobę genetyczną lub z wrodzoną wadą rozwojową. Decyzję o posiadaniu potomstwa zawsze pozostawia się rodzicom. Najczęstszymi przyczynami zgłaszania się osób do poradni genetycznej są:

- częste przypadki poronień
- wcześniejsze urodzenia dziecka z chorobą genetyczną bądź wrodzoną wadą rozwojową
- zaawansowany wiek przyszłej matki (skończone 35 lat)
- występowanie w rodzinie chorób genetycznych bądź wrodzonych wad rozwojowych
- pokrewieństwo rodziców.

PODSUMOWANIE



- Antykoncepcją nazywamy wszystkie metody i zachowania mające na celu kontrolę narodzin poprzez zapobieganie zapłodnieniu i zajściu w ciążę.
- Naturalne planowanie rodziny jest jedną z grup metod antykoncepcyjnych opierającą się na obserwacji fizjologii cyklu menstruacyjnego.
- Metody mechaniczne to stosowanie środków lub zachowań zapobiegających przedostaniu się plemników w pobliże komórki jajowej.
- Wśród metod hamujących proces owulacji wyróżniamy hormonalne tabletki antykoncepcyjne (jedno- i dwuskładnikowe).
- Do metod utrudniających implantację zarodka należą: wkładka domaciczna (spirala domaciczna) oraz hormonalna antykoncepcja postkoitalna.
- Badania prenatalne stosuje się po to, by wykryć wady rozwojowe płodu lub choroby genetyczne (zespół Downa, Edwardsa, Turnera).
- Nieinwazyjne metody antykoncepcyjne obejmują badanie ultrasonograficzne oraz biochemiczne badanie krwi matki.
- Inwazyjne badania prenatalne wiążą się z ryzykiem dla ciąży, jednak pozwalają zdiagnozować wiele poważnych chorób, w tym genetycznych.

ZADANIA



1. Scharakteryzuj naturalne metody regulacji poczęć.
2. Porównaj mechanizm działania tabletek antykoncepcyjnych jedno- i dwuskładnikowych.
3. Wyjaśnij mechanizm działania wkładki domacicznej.
4. Opisz objawy chorób genetycznych możliwych do wykrycia badaniem ultrasonograficznym.
5. Scharakteryzuj metody inwazyjnych badań prenatalnych. Opisz sytuacje, w których istnieje konieczność ich stosowania.

BIBLIOGRAFIA



- Ana Martos Rubio, *Historia antykoncepcji*, Bellona, 2012.

W INTERNECIE



- http://www.pigulka.pl
- http://www.zdrowieintymne.pl
- http://www.genetyka.hg.pl
- http://www.sigma-bi.pl/prenat.html
- http://sonomedika.pl/prenatalna.htm

Układy narządów i homeostaza organizmu człowieka

Zadanie 1. (2 pkt)

Za pomocą dwóch argumentów wykaż, w jaki sposób układ pokarmowy oraz krwionośny i nerwowy współpracują ze sobą.

Zadanie 2. (1 pkt)

Charakterystyczną cechą ssaków i ptaków jest endotermia (stałocieplność). Wyjaśnij, które układy odgrywają najważniejszą rolę w sprawnym funkcjonowaniu tego mechanizmu.

Zadanie 3. (3 pkt)

Układ nerwowy i hormonalny pełnią w organizmie funkcję regulacyjną w różny sposób. Zaprojektuj tabelę, w której porównasz oba układy pod względem drogi i szybkości działania oraz podasz przykłady funkcji organizmu przez nie regulowanych.

Zadanie 4. (2 pkt)

Wstrzymywanie moczu jest bardzo niezdrowe, a niemożność usunięcia nadmiaru wody z organizmu może mieć tragiczne konsekwencje.

Przedstaw dwa możliwe następstwa wstrzymywania moczu z uwzględnieniem fizjologii poszczególnych układów organizmu.

Zadanie 5. (2 pkt)

Wymienione reakcje zaklasyfikuj jako odruchy warunkowe (A) lub bezwarunkowe (B).

1. odruch ssania
2. wydzielanie śliny na widok jedzenia lub po wyczuciu jego zapachu
3. odruch kolanowy
4. jazda na rowerze
5. zwężenie się źrenic pod wpływem światła
6. pisanie i czytanie
7. odruch płaczu
8. oddychanie w trakcie biegu długodystansowego

Zadanie 6. (2 pkt)

Średnie stężenie glukozy we krwi zdrowego człowieka utrzymuje się na poziomie od 85 do 100 mg/100 cm^3. Jeśli przekroczy ono wartość 160–180 mg/100 cm^3 (tzw. próg nerkowy dla glukozy), pewna część cukru nie będzie całkowicie resorbowana z moczu pierwotnego.

Oceń, co się stanie, gdy stężenie glukozy we krwi przekroczy próg nerkowy, oraz podaj schorzenie zaburzające procesy homeostazy, które może prowadzić do takiej sytuacji.

Zadanie 7. (1 pkt)

Spośród podanych struktur i narządów skreśl te, których nie zalicza się do efektorów termoregulacyjnych.

układ krwionośny, przepona, gruczoły potowe skóry, układ limfatyczny, wątroba, nerki, płuca, układ rozrodczy, mięśnie szkieletowe, gruczoły łojowe, trzustka, śledziona, tkanka tłuszczowa

Zadanie 8. (2 pkt)

W sytuacji długotrwałego obniżenia temperatury ustroju zostaje uruchomiony mechanizm homeostatyczny wykorzystujący hormony, który prowadzi do zwiększenia tempa całego metabolizmu.
Wymień dwa hormony odgrywające główną rolę w tym procesie oraz nazwij narząd, w którym są one produkowane.

Zadanie 9. (3 pkt)

Stan odwodnienia (dehydratacji) może poważnie zaburzyć funkcjonowanie ustroju. Regulacja zasobów wody w organizmie odbywa się na drodze hormonalnej, głównie za pomocą wazopresyny – hormonu antydiuretycznego wydzielanego przez przysadkę.
Scharakteryzuj mechanizm, dzięki któremu wazopresyna reguluje poziom wody w organizmie. Podaj trzy czynniki, które wpływają na zwiększenie wydzielania tego hormonu.

Zadanie 10. (1 pkt)

Do poradni leczenia uzależnień skierowano pacjenta, u którego stwierdzono silne zwężenie źrenic (obserwowane także w pomieszczeniu słabo oświetlonym). Pacjent miał również problemy z oddychaniem (objawiające się zmniejszeniem liczby oddechów), bóle żołądka, a w trakcie pobytu w ośrodku oddawał niewielkie ilości moczu.
Określ, od jakiego narkotyku jest uzależniona osoba, której dotyczy opis.

Zadanie 11. (3 pkt)

Szczególnie niebezpieczną substancją o działaniu toksycznym jest tlenek węgla (czad). Po przedostaniu się do krwioobiegu człowieka łączy się on z hemoglobiną i tworzy karboksyhemoglobinę – związek o wiele trwalszy niż oksyhemoglobina (połączenie hemoglobiny z tlenem). Za podstawowe źródło czadu uznaje się spaliny, dym kominowy oraz dym papierosowy.
Podaj uzasadnienie opinii, że u ludzi palących papierosy wydolność fizyczna jest niższa niż u ludzi niepalących.
Wymień dwa układy, których funkcjonowanie zmienia się po zapaleniu papierosa. Opisz te zmiany.

Zadanie 12. (3 pkt)

Stresem nazywamy każdą reakcję organizmu na działanie **stresorów** zaburzających stan homeostazy. Gdy stres trwa krótko, nie powoduje poważnych konsekwencji, a organizm szybko wraca do równowagi. Dzieje się to dzięki mobilizacji wielu narządów i zwiększeniu wydajności ich pracy.
Uzupełnij tabelę, wpisując przykłady narządów uaktywnianych w czasie stresu. Wymień reakcje, które w nich wówczas zachodzą.

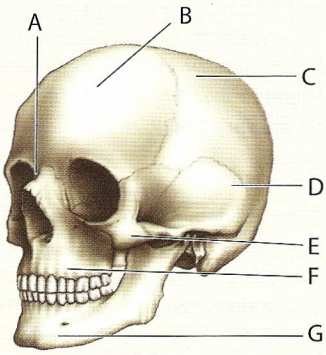
Narząd mobilizowany w czasie stresu	Mechanizm mobilizacji

Układ narządów ruchu

Zadanie 1. (3 pkt)

Rycina przedstawia budowę czaszki człowieka.

Przyporządkuj poszczególnym literom odpowiednie nazwy kości czaszki. W tabeli wpisz oznaczenia literowe kości należących do trzewioczaszki i mózgoczaszki. Określ funkcje tych kości.

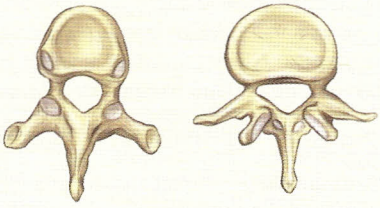


Kości mózgoczaszki	Kości trzewioczaszki

Zadanie 2. (2 pkt)

Dla sprawnego funkcjonowania kręgosłupa człowieka w postawie wyprostowanej istotne znaczenie ma wyrostek kolczysty położony po grzbietowej stronie ciała.

Na podstawie ilustracji określ różnicę w budowie wyrostków kolczystych kręgów odcinka piersiowego oraz lędźwiowego. Podaj, dlaczego punkcję rdzenia kręgowego (której celem jest pobranie płynu mózgowo-rdzeniowego) wykonuje się w odcinku lędźwiowym, a nie w piersiowym kręgosłupa.



Zadanie 3. (3 pkt)

Uczniowie przeprowadzili doświadczenie: dwie wysokie zlewki (o pojemności 1 l) wypełnili odpowiednio dziesięcioprocentowym roztworem kwasu octowego i wodą. W każdej umieścili trzy kości długie pochodzące ze szkieletu kurczaka. Zostawili oba naczynia w zimnym pomieszczeniu na 10 dni. Po tym czasie zaobserwowali, jak zachowują się kości pod wpływem kwasu octowego.

Sformułuj problem badawczy opisanego doświadczenia. Określ, co stanowiło w nim grupę kontrolną, a co – badaną. Sformułuj hipotezę badawczą i podaj jej spodziewane wyjaśnienie.

Zadanie 4. (2 pkt)

Przyporządkuj nazwom kości (A–D) ich lokalizację w organizmie człowieka (1–6). Lokalizacje mogą się powtarzać.

A. obrotnik
B. lemiesz
C. kość kulszowa
D. kość strzałkowa

1. pas barkowy i szkielet kończyny górnej
2. pas miednicowy i szkielet kończyny dolnej
3. mózgoczaszka
4. trzewioczaszka
5. kręgosłup
6. szkielet klatki piersiowej

Zadanie 5. (2 pkt)

Do wymienionych elementów budowy mięśnia (A–E) przyporządkuj odpowiadające im opisy (1–6).

A. sarkolema
B. sarkomer
C. sarkoplazma
D. troponina
E. miofilamenty

1. błona pokrywająca włókno mięśniowe (miocyt)
2. cytoplazma komórki mięśniowej
3. białka oplatające się wokół aktyny i blokujące miozynie dostęp do niej
4. kurczliwe białka aktynowo-miozynowe
5. element funkcjonalny komórki mięśniowej składający się z połowy prążka I, całego prążka A oraz połowy kolejnego prążka I
6. białka wiążące jony wapnia i powodujące zmianę organizacji przestrzennej białek blokujących dostęp miozyny do aktyny

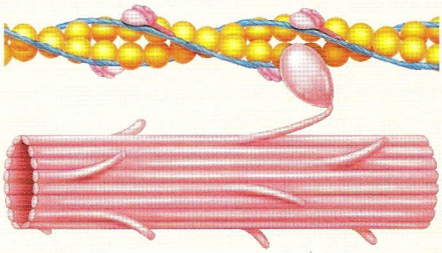
Zadanie 6. (3 pkt)

Widoczne poprzeczne prążkowanie mięśni szkieletowych człowieka jest związane z obecnością w nich pewnego związku.

Podaj nazwę tego związku i opisz jego rolę. Wyjaśnij, na czym polega zależność między ilością tej substancji w mięśniach a ilością mitochondriów w komórkach mięśniowych.

Zadanie 7. (3 pkt)

Rysunek przedstawia moment przyłączenia się głowy miozyny do odsłoniętej cząsteczki aktyny w komórkach mięśniowych.



Wskaż na rysunku aktynę i miozynę. Określ, jakie składniki związku transportującego energię znajdują się w tym momencie w głowie miozyny. Wyjaśnij, jak zmieni się kształt miozyny połączonej z aktyną, gdy oba miofilamenty wykonają ruch względem siebie.

Zadanie 8. (1 pkt)

Dla prawidłowej pracy mięśni niezbędna jest odpowiednia ilość wapnia przyjmowanego z pokarmem.

Wykorzystując wiedzę na temat fizjologii skurczu mięśnia, wyjaśnij, który etap skurczu zostaje zaburzony w przypadku braku wapnia i jaki jest tego skutek.

Zadanie 9. (2 pkt)

Wśród podanych mięśni wskaż te, które stanowią mięśnie obręczy miednicznej i kończyny dolnej.

przepona, mięsień międzyżebrowy zewnętrzny, mięsień krawiecki, mięsień kapturowy, mięsień płaszczkowaty, mięsień skrzydłowy boczny, mięsień pośladkowy

Zadanie 10. (2 pkt)

Określ prawdziwość podanych stwierdzeń: dopisz obok nich literę P (zdanie prawdziwe) lub literę F (zdanie fałszywe).

A. Mięsień trójgłowy ramienia odgrywa rolę prostownika.
B. Przepona oddziela klatkę piersiową od jamy brzusznej.
C. Jednostronny skurcz mięśnia skośnego brzucha umożliwia zginanie tułowia do przodu.
D. Za utrzymanie pionowej postawy ciała odpowiada mięsień pośladkowy wielki.
E. Warstwa środkowa mięśni szyi pozwala na jej wyginanie na boki.

Zadanie 11. (2 pkt)

Obok nazw systemów generowania energii w mięśniach wpisz odpowiednie substraty energetyczne (wybrane spośród wymienionych).

1. System fosfokreatynowy: .....
2. System mleczanowy: .....
3. System tlenowy: .....

glukoza, fosfokreatyna, glikogen mięśniowy, glikogen wątrobowy, kwasy tłuszczowe

Układ pokarmowy

Zadanie 1. (2 pkt)

Żelazo to jeden z najważniejszych składników hemoglobiny, która jest jednocześnie głównym magazynem tego pierwiastka w organizmie. Dobowe zapotrzebowanie dorosłego człowieka na żelazo zależy od płci (u mężczyzn wynosi 15 mg, a u kobiet – 18 mg).

Wymień jeden skutek, jaki ma dla zdrowia niedobór żelaza w organizmie. Wyjaśnij, co jest przyczyną większego dobowego zapotrzebowania na żelazo obserwowanego u kobiet.

Zadanie 2. (1 pkt)

Kobalt jest niezbędny do prawidłowego przebiegu procesu wytwarzania erytrocytów. Pierwiastek ten występuje w witaminie B_{12} (kobalaminie), która w odróżnieniu od wielu innych witamin nie jest syntetyzowana przez rośliny.

Scharakteryzuj wpływ ścisłego wegetarianizmu na organizm i podaj nazwę choroby, która może być jego skutkiem.

Zadanie 3. (2 pkt)

W tabeli porównano zawartości wybranych aminokwasów egzogennych w białku zwierzęcym i roślinnym (w gramach aminokwasów na 100 gramów białka).

Wśród wymienionych aminokwasów podaj ten, którego niedobór w organizmie może być skutkiem stosowania diety wegetariańskiej, oraz ten, którego najlepszym źródłem jest białko roślinne.

Aminokwas	Białko zwierzęce (wołowina)	Białko roślinne (fasola)	Białko roślinne (kukurydza)
fenyloalanina	5,0	8,0	6,5
leucyna	7,7	10,5	24,0
lizyna	8,2	7,2	0
tryptofan	1,4	0	0

Zadanie 4. (2 pkt)

Płyny ustrojowe i wydzieliny organizmu człowieka mogą mieć różny odczyn.

a) Wpisz obok każdej wymienionej wydzieliny charakterystyczny dla niej odczyn (kwaśny, obojętny lub zasadowy).

1. sok żołądkowy ..... 2. sok trzustkowy .....

b) Wyjaśnij, jakie znaczenie dla funkcjonowania układu pokarmowego ma różny odczyn soku żołądkowego i trzustkowego.

Zadanie 5. (1 pkt)

Mięśnie gładkie budują ściany wielu narządów wewnętrznych. Skurcze tych mięśni powodują, że w otaczanej przez nie przestrzeni wytwarza się wysokie ciśnienie.

Wyjaśnij, w jaki sposób opisany sposób działania mięśni gładkich wpływa na prawidłową pracę układu pokarmowego.

Zadanie 6. (2 pkt)

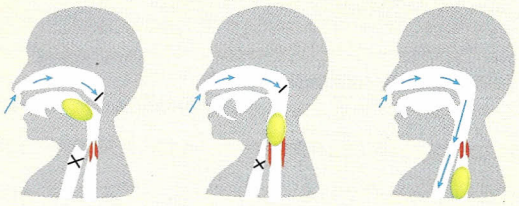
Bilans energetyczny organizmu oznacza różnicę pomiędzy ilością energii dostarczanej organizmowi wraz z pokarmem a ilością energii zużywanej przez organizm na podtrzymanie procesów metabolicznych. Anoreksja jest zaburzeniem o podłożu psychicznym, prowadzącym do przyjmowania posiłków w ilości niepozwalającej na pokrycie rzeczywistego zapotrzebowania energetycznego organizmu.

Określ przyczyny wystąpienia anoreksji oraz wymień konsekwencje zdrowotne, jakie może mieć przyjmowanie kalorii w ilości niepozwalającej na pokrycie zapotrzebowania organizmu.

Układ oddechowy

Zadanie 1. (2 pkt)

Rysunek przedstawia zmiany zachodzące w układzie oddechowym w czasie połykania kęsa pokarmu.



Przeanalizuj schemat, a następnie określ prawdziwość podanych stwierdzeń: wpisz obok nich literę P (zdanie prawdziwe) lub literę F (zdanie fałszywe).

A. W czasie połykania pokarmu fałd nagłośni zamyka dostęp do przełyku i jamy nosowej.
B. Gardło jest miejscem krzyżowania się układu oddechowego i pokarmowego.
C. Gardło rozgałęzia się na znajdujący się w przedniej części ciała przełyk i położoną za nim krtań.
D. Jama nosowa łączy się z gardłem za pomocą zatok przynosowych.
E. Podczas mówienia i oddychania nagłośnia jest otwarta.
F. W czasie połykania pokarmu podniebienie miękkie zamyka otwór nozdrzy wewnętrznych.

Zadanie 2. (2 pkt)

Przyporządkuj wymienionym elementom układu oddechowego (A–D) opisy pełnionych przez nie funkcji (1–5).

A. gardło
B. tchawica
C. nozdrza wewnętrzne
D. głośnia

1. Powietrze przemieszcza się nimi w kierunku gardła.
2. Zamyka wejście do tchawicy w czasie połykania pokarmów.
3. Krzyżują się tam drogi oddechowe i pokarmowe.
4. Jest miejscem, w którym w wyniku drgania strun głosowych powstają dźwięki.
5. Przemieszcza powietrze w kierunku płuc.

Zadanie 3. (2 pkt)

Wśród podanych zdań podkreśl dwa zawierające błędne informacje na temat mechanizmów wymiany gazowej u człowieka. Zredaguj je tak, aby zawierały poprawne informacje.

A. Podwyższona zawartość O_2 rozpuszczonego we krwi stymuluje ośrodek oddechowy w rdzeniu przedłużonym do zwiększenia tempa wdechów.
B. Spadek pH krwi stymuluje ośrodek oddechowy do zwiększenia częstotliwości oddechów oraz głębokości wentylacji płuc.
C. Objętość zalegająca powietrza w płucach zostaje usunięta (zredukowana do zera) w przypadku rozszczelnienia klatki piersiowej (np. w wyniku perforacji opłucnej).
D. Krwinki czerwone we krwi odtlenowanej są wypełnione tlenem w 70%.
E. Dwutlenek węgla w postaci karbaminianów jest transportowany w większym stopniu przez erytrocyty niż przez osocze.

Zadanie 4. (1 pkt)

Zanieczyszczenie powietrza tlenkiem węgla (czadem) jest szczególnie niebezpieczne dla osób mieszkających na obszarze dużego zanieczyszczenia powietrza spalinami oraz wdychających dym papierosowy (czynnie i biernie).

Uzasadnij opinię, że wydolność fizyczna ludzi palących papierosy jest niższa niż osób niepalących.

Zadanie 5. (3 pkt)

Na podstawie tabeli narysuj wykresy słupkowe wartości ciśnienia dwóch najważniejszych gazów oddechowych. Następnie odpowiedz na pytania.

Ciśnienie (w mmHg)						
Gaz	Atmosfera	Powietrze		Krew		Tkanki
		wydychane	pęcherzykowe	tętnicza	żylna	
O_2	159	116	100	95	40	30
CO_2	0,3	32	40	40	46	46

1. **Dlaczego ciśnienie tlenu w powietrzu wydychanym jest wyższe niż w pęcherzykowym?**
2. **Dlaczego ilość dwutlenku węgla w powietrzu wydychanym spada w porównaniu z ilością powietrza pęcherzykowego?**

Zadanie 6. (2 pkt)

Do nazw chorób układu oddechowego (A–D) przyporządkuj opisy tych chorób (1–5).

A. zapalenie oskrzeli
B. mukowiscydoza
C. gruźlica
D. astma

1. Jedną z metod diagnostyki jest wykonanie skórnej próby tuberkulinowej.
2. gorączka, dreszcze, bóle mięśniowo-stawowe
3. furkoczący oddech, ból gardła, kaszel, niekiedy duszności
4. zaburzenie transportu jonów chlorkowych przez nabłonek oddechowy
5. zwężenie oskrzeli w kontakcie ze związkiem pochodzenia zewnętrznego

Zadanie 7. (3 pkt)

W tabeli przedstawiono dane dotyczące zapadalności na grypę i gruźlicę w Polsce w latach 2000–2009 (źródło: GUS).

Liczba zarażonych osób				
rodzaj choroby	rok			
	2000	2005	2008	2009
gruźlica	11 477	9269	8081	8236
grypa	1 596 920	733 234	227 346	1 081 974

Narysuj wykresy zmian zapadalności na wymienione choroby w określonym przedziale czasowym.
Określ tendencję obserwowanych zmian oraz podaj, która choroba stanowi potencjalnie większe zagrożenie epidemiologiczne.

Układ krwionośny

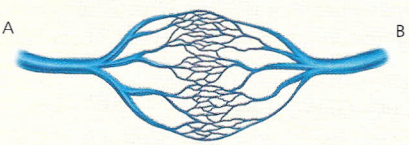
Zadanie 1. (3 pkt)

Określ, które dwa zdania zawierają niepoprawne informacje na temat budowy układu krwionośnego, i sformułuj je tak, aby brzmiały prawidłowo.

1. Od nasady aorty wstępującej odgałęziają się naczynia wieńcowe, które zaopatrują serce w krew.
2. Funkcjonalny mięsień sercowy jest nazywany wsierdziem.
3. Najgrubszą ścianę ma lewa komora serca.
4. Załamek T na wykresie EKG odpowiada rozkurczowi komór.
5. Ciśnienie rozkurczowe to najniższe ciśnienie krwi w tętnicach – występuje podczas rozkurczu serca i powinno wynosić około 80 mmHg.
6. Pęczek Hisa, stanowiący element układu bodźcotwórczo-przewodzącego serca, to inaczej pęczek przedsionkowo-komorowy.

Zadanie 2. (2 pkt)

Nazwij rodzaj sieci naczyń krwionośnych przedstawiony na ilustracji i podaj przykładowe narządy znajdujące się w miejscach oznaczonych jako A i B.



Zadanie 3. (2 pkt)

Przyporządkuj poszczególnym rodzajom leukocytów (A–E) opisy funkcji, jakie pełnią (1–6).

A. limfocyt B
B. eozynofil
C. bazofil
D. monocyt
E. neutrofil

1. Odpowiada za rozwój stanu zapalnego i wysięków ropnych.
2. Produkuje interferon, hamujący namnażanie się wirusów.
3. Odpowiada za swoiste rekcje immunologiczne, wykorzystujące przeciwciała.
4. Nie wykazuje zdolności do fagocytozy, produkuje serotoninę.
5. Komórka macierzysta szpiku, z której powstają wszystkie składniki morfotyczne krwi.
6. Odpowiada za niszczenie alergenów i reakcje przeciw pasożytom.

Zadanie 4. (2 pkt)

Określ prawdziwość podanych stwierdzeń: wpisz obok każdego z nich literę P (zdanie prawdziwe) lub literę F (zdanie fałszywe).

1. Miażdżyca tętnic to jednostka chorobowa obejmująca wyłącznie zwężenie tętnic wieńcowych.
2. Blaszka miażdżycowa blokująca przepływ w tętnicy wieńcowej może pochodzić z naczynia w odległej części organizmu.
3. Optymalne ciśnienie krwi u osoby zdrowej wynosi około 120/80 mmHg.
4. Udar niedokrwienny mózgu objawia się pęknięciem naczyń krwionośnych w obrębie tego narządu.

Układ odpornościowy

Zadanie 1. (2 pkt)

Człowiek jest nieustannie narażony na działanie patogenów, usiłujących przedostać się do wnętrza jego organizmu. Przeciwdziałanie temu, a także minimalizowanie ewentualnych skutków inwazji, umożliwiają mechanizmy odpornościowe, które dzieli się na nieswoiste i swoiste.

Spośród przedstawionych fizjologicznych mechanizmów immunologicznych wybierz dwa, które można zaliczyć do odporności nieswoistej.

1. wydzielanie przez komórki plazmatyczne przeciwciał rozpoznających obce antygeny
2. kwas żołądkowy wydzielany przez komórki okładzinowe śluzówki żołądka
3. uwalnianie interferonu przez leukocyty w odpowiedzi na zakażenie komórki wirusem
4. lizozym wydzielany do łez, mający zdolność niszczenia ściany komórkowej bakterii
5. niszczenie komórki przeszczepionego narządu przez komórki limfocytów Tc

Zadanie 2. (2 pkt)

Przed transplantacją najważniejszą sprawą jest ustalenie stopnia zgodności tkankowej między dawcą narządu a jego biorcą.

Wśród wymienionych osób wskaż tę, która twoim zdaniem będzie najlepszym dawcą nerki dla mężczyzny czekającego na przeszczep tego narządu. Odpowiedź uzasadnij.

1. matka pacjenta
2. siostra bliźniaczka pacjenta
3. monozygotyczny brat bliźniak pacjenta
4. osobnik niespokrewniony, mający grupę krwi zgodną pod względem układu ABO i Rh
5. krewny drugiego stopnia

Zadanie 3. (2 pkt)

Na świecie z roku na rok rośnie liczba przypadków zakażenia wirusem HIV. Wciąż trwają badania nad opracowaniem skutecznej szczepionki. Stosowane obecnie terapie z wykorzystaniem kombinacji leków (leczenie skojarzone) pozwalają utrzymać poziom komórek układu odpornościowego na stałym poziomie, jednak nie usuwają całkowicie wirusa z ustroju.

Podaj przykład leku stosowanego w terapii i opisz jego działanie.

Zadanie 4. (2 pkt)

Wśród podanych zdań wskaż to, które nieprawidłowo charakteryzuje wirusa HIV, a następnie sformułuj jego poprawną wersję.

1. Najwięcej osób zakażonych wirusem HIV to narkomani używający wielokrotnie tej samej igły i strzykawki.
2. Wirus HIV integruje się z komórkami wyposażonymi w antygen powierzchniowy CD4.
3. W leczeniu AIDS stosuje się terapię skojarzoną.

Układ wydalniczy

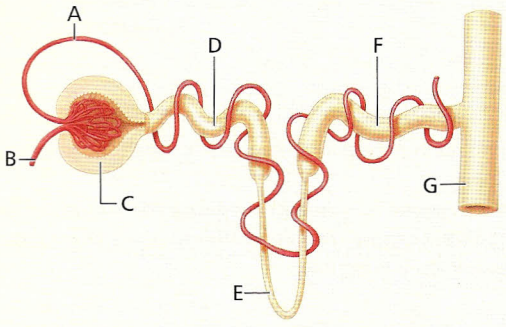
Zadanie 1. (2 pkt)

Wśród zdań dotyczących układu wydalniczego wskaż dwa zawierające błędne informacje.

1. Za pośrednictwem skóry z ustroju są usuwane (oprócz wody i chlorku sodu) pewne ilości mocznika.
2. W płucach oprócz dwutlenku węgla jest wydalana również woda (w postaci pary wodnej).
3. Nerki są chronione przez powięź nerkową oraz kości miedniczne.
4. Podstawową jednostką funkcjonalną nerki jest nefron, zbudowany z ciałka nerkowego oraz wychodzącego z niego układu kanalikowego.
5. Rozkurcz zwieracza pęcherza zależy od świadomej woli.
6. Cewka moczowa kobiet jest około cztery razy krótsza od cewki moczowej mężczyzn.

Zadanie 2. (3 pkt)

Schemat przedstawia budowę nefronu.
Na podstawie schematu wpisz obok oznaczeń literowych odpowiednie nazwy części nefronu.



Zadanie 3. (3 pkt)

W tabeli podano zmiany objętości moczu przepływającego przez poszczególne odcinki nefronu (w litrach).
Narysuj wykres ilustrujący zmiany objętości moczu przepływającego przez poszczególne odcinki nefronu oraz wyjaśnij przyczynę zachodzących zmian.

Odcinek nefronu	**Objętość przepływającego moczu** (litry)
kłębuszek nerkowy	100,0
początkowa część kanalika proksymalnego	33,0
końcowa część kanalika proksymalnego	20,0
pętla Henlego	15,0
kanalik dystalny	5,0
kanalik zbiorczy	0,5

Zadanie 4. (1 pkt)

Dializy krwi ratują życie pacjentom cierpiącym na przewlekłą niewydolność nerek. Ostatni etap dializy umożliwia sprawdzenie za pomocą ultradźwiękowego detektora, czy krew nie zawiera pęcherzy powietrza i skrzepów.
Wyjaśnij, dlaczego z krwi oczyszczonej w dializatorze muszą zostać usunięte pęcherze powietrza i skrzepy, zanim zostanie ona wpompowana do krwiobiegu pacjenta.

Układ nerwowy

Zadanie 1. (2 pkt)

Przyporządkuj wymienionym strukturom mózgu (A–F) pełnione przez nie funkcje (1–7). Następnie podaj obszar mózgu odpowiedzialny za realizację funkcji, której nie pełnią wymienione struktury mózgu.

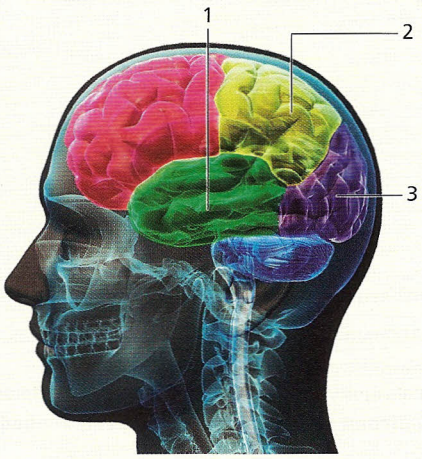
A. szyszynka
B. kora mózgowa
C. rdzeń przedłużony
D. móżdżek
E. układ limbiczny.
F. śródmózgowie

1. Kontroluje równowagę ciała, oddziałując na mięśnie szkieletowe.
2. Zlokalizowane są tutaj ośrodki nerwowe (m.in. oddechowe i pracy serca).
3. Zlokalizowane są tutaj ośrodki odruchu źrenicznego i odruchów słuchowych.
4. Odpowiada za regulację faz snu i czuwania.
5. Odpowiada za tworzenie tzw. pamięci emocjonalnej.
6. Odpowiada za procesy pamięciowe i świadomość.
7. Odpowiada za reakcje emocjonalne i związane z popędami.

Zadanie 2. (3 pkt)

Ilustracja przedstawia schemat kory mózgowej człowieka.

Na podstawie schematu wpisz oznaczenia cyfrowe obok procesów, za które odpowiadają określone obszary kory mózgowej.

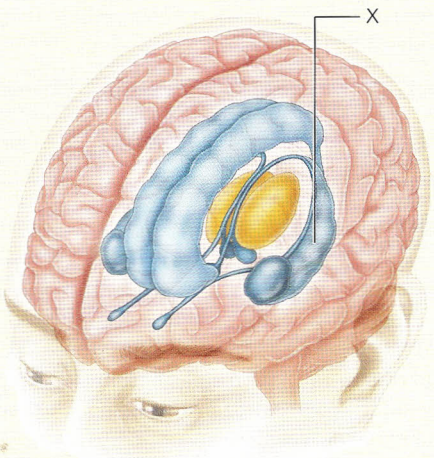


A. odbieranie typowych wrażeń słuchowych i rozpoznawanie muzyki .....
B. widzenie obiektów .....
C. czucie skórne (temperatury, dotyku, bólu, nacisku) .....

Zadanie 3. (3 pkt)

Na ilustracji kolorem niebieskim oznaczono układ zlokalizowany w centralnej części międzymózgowia.

Podaj nazwę tego układu, nazwij strukturę oznaczoną literą X oraz podaj funkcję tej struktury.



Zadanie 4. (1 pkt)

Strukturalną i funkcjonalną jednostką układu nerwowego są neurony, za pośrednictwem których odbywa się przekazywanie informacji. Nośnikami informacji mogą być impulsy elektryczne lub związki chemiczne nazywane neurotransmiterami.

Wyjaśnij rolę, jaką w funkcjonowaniu neuronów odgrywają neuroprzekaźniki (neurotransmitery).

Zadanie 5. (1 pkt)

Poniżej wymieniono elementy kolanowego łuku odruchowego.

A. mięsień czworogłowy uda
B. neuron ruchowy
C. neuron czuciowy
D. receptor położony w ścięgnie rzepki
E. neuron pośredniczący

Zapisz oznaczenia literowe poszczególnych elementów łuku odruchowego w kolejności zgodnej z kierunkiem przewodzenia impulsu nerwowego w tym łuku.

Zadanie 6. (2 pkt)

Poniżej przedstawiono etapy tworzenia pewnego klasycznego odruchu warunkowego.

1. Zapach, widok oraz smak pokarmu zjadanego przez psa prowadzą do wydzielenia śliny przez ślinianki.
2. Bodźce obojętne: świetlne (np. światło żarówki) lub dźwiękowe (np. dzwonek) nie wpływają na wydzielenie śliny przez psa, o ile nie zostaną zastosowane w połączeniu z podawaniem pokarmu.
3. Zastosowanie bodźców obojętnych w połączeniu z podawaniem pokarmu prowadzi do wydzielania śliny przez ślinianki psa.
4. Gdy dojdzie do wykształcenia odruchu warunkowego, światło żarówki lub dźwięk dzwonka nawet bez podawania pokarmu powodują wydzielanie śliny.

Określ, czy jednokrotne zastosowanie bodźca obojętnego wraz z podaniem pokarmu pozwoli na wykształcenie odruchu warunkowego.
Opisz mechanizm tworzenia klasycznego odruchu warunkowego.

Zadanie 7. (2 pkt)

Wśród podanych zdań znajdź to, które zawiera błędną informację. Sformułuj je tak, aby brzmiało poprawnie.

1. W fazie najgłębszego snu dominują fale mózgowe delta.
2. Faza snu REM jest nazywana fazą snu paradoksalnego.
3. W trakcie snu fazy NREM stają się coraz głębsze i trwają dłużej.
4. W fazie REM pojawia się zjawisko paraliżu sennego.

Zadanie 8. (3 pkt)

Po względem charakteru odbieranego bodźca receptory można podzielić na następujące grupy:

A. termoreceptory
B. chemoreceptory
C. nocyreceptory
D. mechanoreceptory
E. magnetoreceptory
F. fotoreceptory

Określ, do których z wymienionych grup można zaliczyć opisane receptory. Dopisz obok rzymskich cyfr odpowiednie oznaczenia literowe.

I. Tworzą narządy słuchu i równowagi.
II. Odbierają wrażenia bólowe w skórze.
III. Odbierają informację o zmieniającym się stężeniu dwutlenku węgla we krwi.

Zadanie 9. (2 pkt)

Wśród poniższych zdań charakteryzujących narząd wzroku wskaż dwa zawierające błędne informacje. Sformułuj je tak, aby brzmiały poprawnie.

1. Za widzenie w nocy odpowiadają wyspecjalizowane komórki siatkówki – czopki.
2. Zadaniem ciała szklistego jest nadawanie gałce ocznej kształtu i sprężystości.
3. Proces akomodacji oka polega na zmianach kształtu soczewki spowodowanych skurczami mięśnia rzęskowego.
4. W skład barwników światłoczułych (rodopsyny i jodopsyny) wchodzi opsyna, czyli pochodna witaminy A.
5. W strefie przebiegu promieni świetlnych znajduje się miejsce najostrzejszego widzenia zwane plamką żółtą.

Zadanie 10. (1 pkt)

Powodowana wiekiem utrata słuchu (ang. *presbyacusis*) sprawia, że osoby po 50. roku życia nie słyszą dźwięków o częstotliwości przekraczającej 12 000 Hz. Największym zakresem słyszalności charakteryzują się osoby młode, które są w stanie usłyszeć dźwięki dochodzące do częstotliwości 20 000 Hz.

Wyjaśnij, co może powodować utratę słuchu obserwowaną w późniejszym okresie życia.

Zadanie 11. (1 pkt)

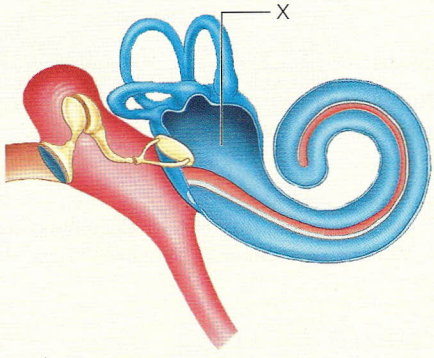
Kubki smakowe rozpoznają pięć podstawowych smaków: słony, kwaśny, słodki, gorzki oraz umami. Smak słodki kojarzy się przede wszystkim z cukrem. Okazuje się jednak, że podobne odczucie wywołuje również wodny roztwór bromku potasu w stężeniu 0,01 mol/dm^3. Roztwór tej samej soli o stężeniu 0,04 mol/dm^3 jest odczuwany jako słono-gorzki, a o stężeniu 0,2 mol/dm^3 – jako słony.

Na podstawie powyższych informacji określ, od czego może zależeć odczuwalny smak pokarmu.

Zadanie 12. (2 pkt)

Schemat przedstawia strukturę błędnika błoniastego.

Wpisz obok oznaczeń cyfrowych nazwy elementów błędnika błoniastego. Określ, za co odpowiadają komórki czuciowe zlokalizowane w miejscu oznaczonym literą X.



Zadanie 13. (2 pkt)

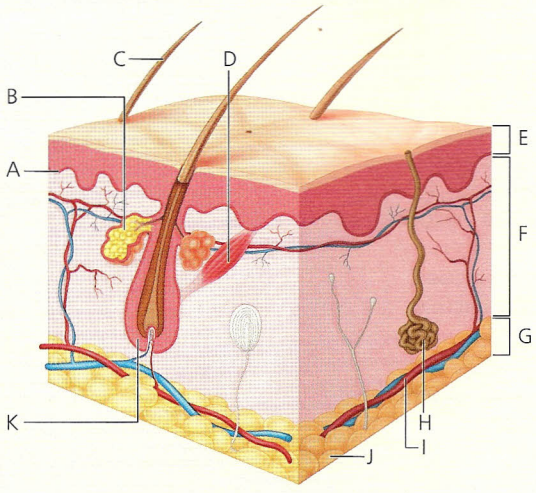
Wśród zdań dotyczących higieny narządu wzroku i słuchu znajdź dwa zawierające nieprawdziwe informacje.

1. Odległość osoby pracującej przy komputerze od monitora musi wynosić około 70 cm.
2. Najlepszym rodzajem oświetlenia do pracy jest światło dzienne, punktowe.
3. Praca przy komputerze może prowadzić do przesuszania rogówki wskutek rzadszego mrugania.
4. Jeżeli pracujemy w pomieszczeniach o dużym natężeniu hałasu, powinniśmy stosować nauszniki przeciwhałasowe, hełmy lub wkładki douszne.
5. Długotrwała praca przy komputerze może doprowadzić do osłabienia mięśni gałki ocznej i w konsekwencji – do gorszej akomodacji.

Układ powłokowy

Zadanie 1. (2 pkt)

Na rysunku przedstawiono budowę fragmentu skóry człowieka.



Podaj nazwy struktur oznaczonych literami L i J oraz podaj po jednej funkcji charakterystycznej dla każdej z nich.

Element	Nazwa elementu budowy	Funkcja
L		
J		

Zadanie 2. (3 pkt)

Przyporządkuj wymienionym chorobom skóry (A–D) odpowiadające im opisy (1–5). Podaj rodzaj czynnika wywołującego każdą z tych chorób.

A. czyrak
B. półpasiec
C. szkarlatyna
D. grzybica błon śluzowych

1. bóle skórno-mięśniowe i wysypka na jednej połowie ciała
2. łuszczące się zmiany obejmujące okolice owłosionej skóry głowy
3. czop martwiczy na szczycie zmiany
4. biały nalot na powierzchni języka
5. rumień na twarzy poza okolicą nosa i ust (tzw. trójkąt Fiłatowa)

Układ hormonalny

Zadanie 1. (3 pkt)

Każdemu z wymienionych hormonów (A–E) przyporządkuj gruczoł dokrewny (1–6), w którym dochodzi do jego produkcji i wydzielania. Określ funkcję, jaką ten hormon pełni w ustroju (I–VII). Rozwiązanie wpisz do tabeli.

A. hormon luteinizujący (LH)
B. tyroksyna
C. parathormon
D. kortyzol
E. glukagon

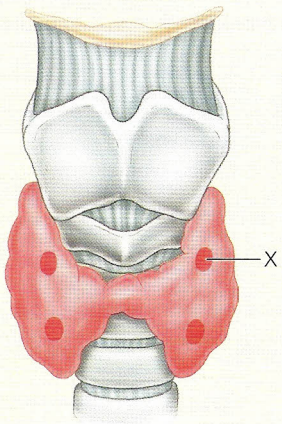
1. tarczyca
2. przytarczyce
3. kora nadnerczy
4. rdzeń nadnerczy
5. trzustka
6. przysadka mózgowa

I. Podwyższa ciśnienie i jest nazywany hormonem stresu.
II. Bierze udział w regulacji gospodarki wapniowej ustroju.
III. Wywołuje owulację.
IV. Przyspiesza metabolizm komórek ustroju.
V. Zwiększa tempo erytropoezy (tworzenia krwinek czerwonych).
VI. Podwyższa stężenie glukozy we krwi.
VII. Odpowiada za kontrole faz snu i czuwania.

Hormon	Miejsce powstawania	Funkcja

Zadanie 2. (2 pkt)

Podaj nazwę gruczołu dokrewnego oznaczonego na rysunku literą X. Regulacją gospodarki jakiego pierwiastka zajmuje się hormon wydzielany przez ten gruczoł?



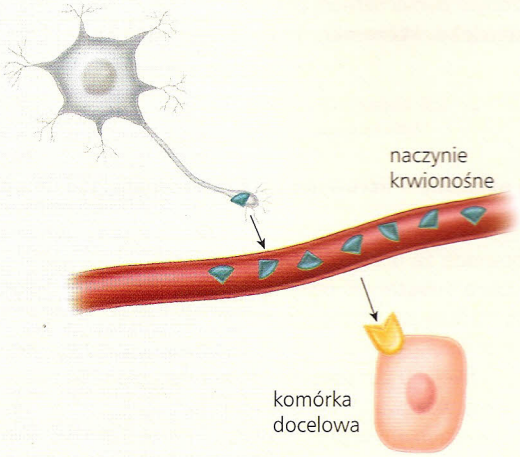
Zadanie 3. (2 pkt)

Wśród podanych zdań wskaż dwa zawierające nieprawdziwą informację.

1. Do hormonów steroidowych zaliczamy hormony nadnerczy oraz hormony płciowe.
2. Zadaniem hormonów tropowych jest regulacja wydzielania hormonów efektorowych przez inne gruczoły.
3. Gastryna jest jednym z wielu hormonów produkowanych przez przysadkę mózgową.
4. Wazopresyna i oksytocyna należą do neurohormonów.
5. Adrenalina pod względem budowy chemicznej jest białkiem zbudowanym z 32 aminokwasów.

Zadanie 4. (3 pkt)

Na rysunku pokazano mechanizm wydzielania pewnego rodzaju hormonu. Napisz, jaki to rodzaj wydzielania, podaj przykład hormonu wydzielanego w ten sposób oraz nazwę tkanki/gruczołu, w której/którym znajdują się komórki wydzielające ten hormon.



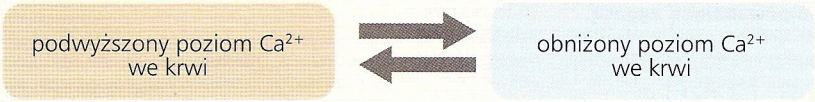
Zadanie 5. (1 pkt)

Właściwy poziom jonów wapnia we krwi jest efektem antagonistycznego działania dwóch hormonów – kalcytoniny i parathormonu.

Kalcytonina
- Hamuje uwalnianie wapnia z kości.
- Wbudowuje Ca^{2+} do kości.
- Ułatwia wydalanie Ca^{2+} z moczem.

Parathormon
- Uwalnia wapń z kości.
- Zwiększa resorpcję zwrotną Ca^{2+} z kanalików nerkowych.
- Zwiększa wchłanianie Ca^{2+} ze światła jelita.

Uzupełnij schemat, wpisując nad każdą strzałką nazwę odpowiedniego hormonu.



Układ rozrodczy

Zadanie 1. (1 pkt)

Gatunek ludzki cechuje się wyraźnie zaznaczonym dymorfizmem płciowym.
Podaj dwa przykłady cech budowy ciała człowieka, które określają różnice między kobietą i mężczyzną.

Zadanie 2. (2 pkt)

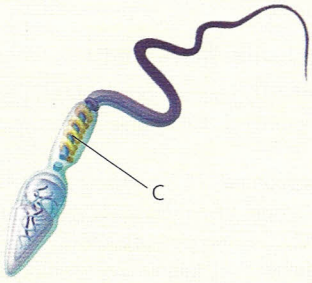
Przyporządkuj do elementów oznaczonych symbolami litrowymi (A–E) odpowiadające im opisy funkcji (1–6).

A. najądrze
B. komórka Lydiga
C. endometrium
D. gruczoł opuszkowo-cewkowy
E. pęcherzyk nasienny

1. Odpowiada za produkcję testosteronu.
2. Wydziela substancję odżywiającą plemniki.
3. Jest to faza złuszczania się błony śluzowej macicy.
4. Jest to inne określenie błony śluzowej macicy.
5. W tym miejscu ostatecznie dojrzewają plemniki.
6. Wydziela śluzowatą wydzielinę ułatwiającą wyprowadzenie nasienia.

Zadanie 3. (2 pkt)

Rysunek przedstawia schemat budowy plemnika człowieka.
Nazwij odcinek zaznaczony na rysunku literą C oraz wymień jego funkcje. Wyjaśnij, czy jest on całkowicie wystarczający do tego, aby plemnik pokonał drogę z pochwy do bańki jajowodu, gdzie zachodzi zapłodnienie.



Zadanie 4. (2 pkt)

W czasie reakcji akrosomalnej główka jednego plemnika osiąga swój cel: aby wniknąć do komórki jajowej, pokonuje jej osłonkę przejrzystą. W trakcie wnikania nie wszystkie elementy ciała plemnika zostają przez komórkę jajową wchłonięte.
Wymień elementy, które pozostają poza komórką jajową w momencie zapłodnienia. Oceń, jakie znaczenie ma ten fakt dla proporcjonalności ilości dziedziczonego materiału genetycznego przez nowo powstającą zygotę.

Zadanie 5. (3 pkt)

Uporządkuj przebieg procesu zapłodnienia: podane etapy uszereguj od 1. do 5. Wyjaśnij, który z nich opisano niepoprawnie, i podaj poprawną wersję.

A. dokończenie drugiego podziału mejotycznego przez komórkę jajową
B. wydzielenie przez przysadkę hormonu luteinizującego
C. zapłodnienie komórki jajowej w bańce jajowodu
D. przekształcenie pęcherzyka Graafa w ciałko żółte
E. produkcja gonadotropiny kosmówkowej przez ciałko żółte
F. pęknięcie pęcherzyka Graafa i uwolnienie komórki do jajowodu

Zadanie 6. (3 pkt)

Zmiany stężenia hormonów płciowych u kobiety można obserwować, analizując poziom tych hormonów w moczu. W wyniku przeprowadzenia dokładnej analizy próbek moczu pewnej pacjentki określono poziom progesteronu wydalanego przez nią z moczem w ciągu doby na przestrzeni kolejnych trzech miesięcy.

Na podstawie danych w tabeli narysuj poprawnie wykres przebiegu zmian stężenia progesteronu w moczu pacjentki.

Data analizy	Poziom progesteronu [mg/24 godziny]	Data analizy	Poziom progesteronu [mg/24 godziny]
5 maja 2012	5	19 czerwca 2012	1,5
8 maja 2012	0,2	22 czerwca 2012	2
11 maja 2012	0,2	25 czerwca 2012	3
14 maja 2012	0,3	28 czerwca 2012	4
17 maja 2012	0,3	1 lipca 2012	4
20 maja 2012	1	4 lipca 2012	5
23 maja 2012	2	7 lipca 2012	6
26 maja 2012	3	10 lipca 2012	7
29 maja 2012	3	13 lipca 2012	7
1 czerwca 2012	4	16 lipca 2012	8
4 czerwca 2012	0,1	19 lipca 2012	7
7 czerwca 2012	0,1	22 lipca 2012	8
10 czerwca 2012	0,2	25 lipca 2012	8
13 czerwca 2012	0,8	28 lipca 2012	9
16 czerwca 2012	1	31 lipca 2012	8

Na wykonanym wykresie zaznacz początek i koniec cyklu miesięcznego oraz porównaj przebieg wykresu w maju z tym obserwowanym w okresie od czerwca do lipca. Podaj prawdopodobną przyczynę różnic.

Zadanie 7. (2 pkt)

Istnieje udowodniona zależność między niedoborem kwasu foliowego w diecie kobiet w ciąży a zwiększonym ryzykiem wystąpienia defektów cewy nerwowej (rozszczep rdzenia kręgowego i kręgosłupa) u ich dzieci. Naukowcy wykazali, że po ekspozycji na ostre światło słoneczne ludzie o jasnej skórze mieli znacznie obniżony poziom kwasu foliowego we krwi. W 1996 r. argentyński pediatra P. Lapunzina opisał przypadki trzech młodych zdrowych kobiet, które opalały się w solarium we wczesnych tygodniach ciąży i urodziły dzieci z wadami rozwojowymi cewy nerwowej.

Na podstawie tekstu sformułuj dwa zalecenia, do których powinny stosować się kobiety we wczesnych tygodniach ciąży, żeby zmniejszyć ryzyko wystąpienia defektów cewy nerwowej u swoich dzieci.

Zadanie 8. (2 pkt)

Jedna z technik diagnostycznych badań prenatalnych – amniopunkcja – polega na pobraniu próbek płynu owodniowego. Przez powłoki brzuszne ciężarnej kobiety wprowadza się do jamy macicy długą igłę, za pomocą której wyciąga się następnie niewielką ilość płynu owodniowego i poddaje go analizie.

Podaj jeden medyczny argument przemawiający za prowadzeniem badań prenatalnych i jeden medyczny argument przeciwko ich prowadzeniu.

INDEKS

A

acetylo-CoA 47, 49, 61
adenozynodifosforan 26
adenozynomonofosforan 26
adenozynotrifosforan 25, 170
adhezja 99
ADP 26
adrenalina 319, 323
akomodacja oka 293
aktyna 158
aktywatory 18
aldosteron 319
alergeny 243
alergie 242
amniopunkcja genetyczna 361
AMP 26
amylaza
- ślinowa 182
- trzustkowa 186

anaboliczne reakcje 35
anabolizm 35
anoreksja 193
anteny energetyczne 74, 87
antygeny 233
- zgodności tkankowej 242

aorta 214
apoenzym 11
arteriioskleroza 229
astma 210
astygmatyzm 295
ATP 25, 170
auksyny 113
autotrofy 68

B

badania prenatalne 361
badanie
- elektrokardiograficzne 216
- ultrasonograficzne 361

bakterie
- chemosyntetyzujące 92
- nitryfikacyjne 93
- purpurowe 68
- siarkowe 92
- wodorowe 93
- żelaziste 93

barwniki 70
- fotosyntetyczne 69

bezsenność 285
białka 176
bilans energetyczny organizmu 190
biopsja trofoblastu 361
błonnik 178
błony płodowe 348
bodźce 289
bradykardia 217
bulimia 192

C

całkowita pojemność płuc 200
cechy płciowe
- drugorzędowe 332
- pierwszorzędowe 332
- trzeciorzędowe 332

centrum aktywne 10, 18, 20
cesarskie cięcie 351
cewka moczowa 251
chemoautotrofy 68
chemolitotrofy 93
chemonastie 108
chemoorganotrofy 93
chemosynteza 66, 92
chemotaksje 107
chłonka 237
chlorofil 68, 69
choroba
- Creutzfeldta-Jacoba 140
- Gravesa–Basedowa 326, 249
- Hashimoto 326
- niedokrwienna serca 143

choroby
- autoimmunizacyjne 248
- bakteryjne 311
- pasożytnicze 312
- wirusowe 312

chrząstka nasadowa 147
chymotrypsynogen 186
ciśnienie
- hydrostatyczne 97, 100
- osmotyczne 97
- parcjalne 202

cukrzyca
- insulinoniezależna 331
- insulinozależna 331

cykl
- Calvina 69, 79
- Krebsa 28, 37, 48
- kwasu cytrynowego 48
- kwasu trikarboksylowego 48
- menstruacyjny 341
- mocznikowy 67
- przemian metabolicznych 34

cytochrom c 54
cytokininy 114
czerniak złośliwy 313

D

dalekowzroczność 294
deaminacja 63
deficyt tlenowy 172
dehydrogenaza mleczanowa 172
dekarboksylacja 44
depolaryzacja 273
depresja 282, 286
dializa 258
drogi oddechowe 194
- dolne 194
- górne 194

dwunastnica 185
dyfuzja 102

E

efektor 276
EKG 216
elektroencefalograf 283
elektroencefalogram 284
energia aktywacji 14
enzymy 8
erytrocyty 223
erytropoetyna 323
estradiol 320, 342

F

fałdy głosowe 195
fale akustyczne 296
faza
- ciemna fotosyntezy 68, 79
- jasna fotosyntezy 68, 74
- NREM 284
- REM 284

fermentacja 37, 42
filtracja 254
fitochrom 116
fitohormony 112
fobie 286
fosfataza białkowa 22
fosfokreatyna 170
fosforylacja 28
- cykliczna 78
- fotosyntetyczna 28, 74, 76
- niecykliczna 77
- oksydacyjna 28, 53
- substratowa 28, 40

fotoautotrofy 68
fotoliza wody 76
foton 75
fotonastie 108
fotooddychanie 84
fotosynteza 68
- typu CAM 88

fotosystemy 74
fototaksje 107
fototropizm 107
fotoukład 74

G

gąbczaste encefalopatie 140
gałka oczna 293
gardło 183
gastrulacja 348
gastryna 323
geotropizm 107
gibereliny 114
glikogen 46
glikoliza 28, 37, 38
glukagon 137, 186, 319
glukoneogeneza 45, 64, 173
glukoza 38, 186
gonady
- męskie 320
- żeńskie 320

grasica 237, 319
gruczoł krokowy 336
gruczoły
- dokrewne 315
- łojowe 307
- potowe 307
- skórne 308
- trawienne 181

grupa
- acetylowa 47
- acylowa 31
- aminowa 63

grupy
- krwi 227
- prostetyczne 12

grypa 209
gutacja 100

H

heliotropizm 107
hemoglobina 201
hiperglikemia 330
- ciążowa 330

hipoteza chemiosmotyczna Mitchella 55, 77
histamina 243
holoenzym 11
homeostaza
hormonalne tabletki antykoncepcyjne 359
hormon
- antydiuretyczny 136

– folikulotropowy 317
– luteinizujący 317
– tropowy 325
hormony 315, 321
– roślinne 110, 112
hydronastie 108
hydrotropizm 108

I
immunoglobuliny 239
impuls nerwowy 272
indukcyjne dopasowanie 11
infekcje dróg oddechowych 207
inhibicja
– kompetycyjna 20
– niekompetycyjna 21
inhibitor 20
inhibitory 18, 247
insulina 319, 330
insulinooporność tkanek 331
istota
– gąbczasta 147
– zbita 147

J
jądra 320
jądro 336
jajeczkowanie 342, 344
jajniki 320, 334
jajowody 335
jamy ciała 128
jaskra 295
jednostka motoryczna mięśnia 164
jelito
– cienkie 185
– czcze 187
– grube 187
– kręte 187
– ślepe 187
jony
– azotanowe (III) 93
– azotanowe (V) 93

K
kalcytonina 318
kamica moczowa 257
kamienie moczowe 257
kanał kręgowy 152
kanały półkoliste 299
kataboliczne reakcje 35
katabolizm 35
kifozy 152
kinaza białkowa 22
klatka piersiowa 154
kłębuszkowe zapalenie nerek 257
koenzym 11
– A 31, 47
– Q 54
kofaktor 11
kohezja 99
kominy hydrotermalne 94
komórka jajowa 341, 342
komórki
– śródmiąższowe Leydiga 320
– wysp trzustki 329
– żerne 235
kompleks enzym-substrat 9
kończyny
– dolne 155
– górne 154
konflikt serologiczny 241
kordocenteza 361
kortykotropina 317
kości
– długie 146
– krótkie 146
– płaskie 146
– różnokształtne 146
kosmówka 348
krążki międzykręgowe 152
kręgosłup 152
kresomózgowie 263
krew 222
krótkowzroczność 294
krtań 195
krzywica 156
kwas
– arachidonowy 176
– linolowy 176
– mlekowy 46
– solny 184

L
lekomania 145
leukocyty 223
limfa 237
limfocyty 236
lipaza żołądkowa 184
listki zarodkowe 348
lordozy 152

Ł
łańcuch oddechowy 28, 37, 53
łechtaczka 335

M
macica 335
maltaza 186
maltoza 186
masa ciała 191
maź stawowa 149
melanina 307
melatonina 319
metody antykoncepcyjne 357
metylotrofy 93
miażdżyca tętnic 229
międzymózgowie 266
mięśnie 164
– synergistyczne 165
miozyna 158
mocznica 258
mocz
– ostateczny 254
– pierwotny 254
moczowody 251
model klucza i zamka 10
morula 347
móżdżek 262, 267
mózg 262
mózgoczaszka 151
mózgowie 262
mukowiscydoza 209

N
naczynia włosowate 219
nadciśnienie tętnicze 230
nadnercza 319
najądrze 336
narząd
– Cortiego 298
– równowagi 299
– słuchu 296
– smaku 300
– węchu 301
– wzroku 289
narządy płciowe
– męskie 336, 337
– żeńskie 334
nasieniowód 336
naskórek 307
nastie 108
nefron 251, 253
nerki 251
nerwy 262
neuron 262
neuroprzekaźniki 274
niewydolność nerek 258
nikotyna 143
nikotynizm 143
noradrenalina 319
nośnik energii 24
nozdrza 194
nyktynastie 109

O
obieg krwi
– duży 214
– mały 214
obieg mały krwi 214
objętość płuc
– oddechowa 200
– uzupełniająca 200
– zalegająca 200
– zapasowa 200
objętość wyrzutowa serca 217
obróbka potranslacyjna 20
obwodowy układ nerwowy 269
odcinek kręgosłupa
– krzyżowy 154
– lędźwiowy 154
– ogonowy 154
– piersiowy 154
– szyjny 154
oddychanie
– beztlenowe 37
– komórkowe 37
odmiedniczkowe zapalenie nerek 257
odruchy
– bezwarunkowe 277
– warunkowe 277
oko 289
okolica węchowa 194
okostna 147
okres rozwoju człowieka
– dojrzałości 355
– dzieciństwa 354
– niemowlęcy 354
– noworodkowy 353
– przedszkolny 354
– starzenia się 356
– szkolny 355
oksydacyjna dekarboksylacja pirogronianu 46
oksyhemoglobina 201
oksytocyna 350, 317
omocznia 348
ontogeneza 353
opony mózgowo-rdzeniowe 268
opsyna 292
organizmy hydrolabilne 96
oskrzela płatowe 197
osmoza 99
ospa wietrzna 312
ośrodek termoregulacji 134, 310
osteoporoza 156
otwór kręgowy 152
otyłość 191
owodnia 348
owulacja 342, 344

P

pamięć 279
parathormon 318
parcie korzeniowe 103
paznokcie 309
pęcherz 251
pęcherzyk Graafa 342
pepsyna 184
pepsynogen 184
pień mózgu 262
pirogronian 41, 45, 85
plamka
- ślepa 292
- żółta 292

planowania rodziny 357
płaskostopie 156
plemnik 340
płód 349
pochwa 335
podpuszczka 184
podwzgórze 316
pojemność minutowa serca 217
pojemność życiowa płuc 200
połóg 352
pompa sodowo-potasowa 272
potencjał
- czynnościowy 273
- spoczynkowy 272
- wody 97, 106

powierzchnia stawowa 148
prezerwatywy 358
proenzym 20
progesteron 320, 343
prolaktyna 317
prostownik 165
przeciwciała 234
przełyk 183
przewlekła obturacyjna choroba płuc 143, 206
przewlekłe zapalenie oskrzeli 206
przewód pokarmowy 181
przezierność karkowa 361
przysadka mózgowa 316, 317
przytarczyce 318
punkt nastawczy termoregulacji 134

R

rak płuc 206
rdzeń
- kręgowy 152, 268
- przedłużony 267

reakcja
- egzoergiczna 24
- endoergiczna 24

reakcje alergiczne 207
receptor 276
receptory 289
renina 137
repolaryzacja 273
resorpcja 254
reszta acetylowa 31
reumatoidalne zapalenie stawów 248
rośliny dnia
- długiego 116
- krótkiego 116

rozedma płuc 206
rozkurcz serca 216
rubisco 80
rybozym 23

S

schizofrenia 286
sejsmonastie 109
sekrecja 254, 255
sen 282, 283
siła asymilacyjna 78
skala Apgar 352
skolioza 156
skóra 306
- właściwa 307

skurcz
- auksotoniczny 162
- izotoniczny 162
- komór 215
- przedsionków 215

sok trzustkowy 186
sole mineralne 180
somnambulizm 285
sprzężenie zwrotne 325
- ujemne 21

stała Michaelisa 16
stawy 148
stresory 141
stwardnienie rozsiane 248
surfaktant 197
susza fizjologiczna 98
syntaza ATP 55, 77
synteza kwasów tłuszczowych 62
system tlenowy 171
szczawiooctan 45, 48
szkielet
- kończyn 150
- osiowy 150

szlak metaboliczny 34
szpiki kostny
- czerwony 147
- żółty 147

szyszynka 319

Ś

ścięgno Achillesa 168
śledziona 238
ślimak 298
śmierć 356
śródmózgowie 267
świerzb 313

T

tachykardia 217
taksje 107
tarczyca 318, 326
termodetektory 134
termonastie 108
termoreceptory 134
tętnice 219
tigmotropizm 108
tkanka podskórna 308
tłuszcze 175
torebka stawowa 149
transpiracja 99, 103
transpiracja szparkowa 109
transport
- aktywny 104
- bierny 105

trawienie
- chemiczne 189
- mechaniczne 189

trofoblast 348
trójjodotyronina 318
trombocyty 225
tropizmy 107
trypsynogen 186
trzewioczaszka 151
trzon kręgu 152
trzustka 185, 186, 319
turgor komórek 109, 110
tylakoidy chloroplastów 68
tyreotropina 317
tyroksyna 318

U

ucho 296
- środkowe 297
- wewnętrzne 297
- zewnętrzne 296

udar mózgu 230
układ
- hormonalny 131, 315
- krążenia 130
- krwionośny 211
- limbiczny 266
- limfatyczny 237
- moczowo-płciowy 131
- narządów ruchu 130
- nerwowy 131, 261
- oddechowy 130, 194
- odpornościowy 131, 233
- pokarmowy 181
- porfirynowy 69
- rozrodczy 334
- trawienny 130

utlenianie 53

W

wady wzroku 294
wargi sromowe 335
wątroba 185
wazopresyna 136, 317
wdech 199
węglowodany 177
węzły chłonne 238
widmo absorpcyjne 70
wirus HIV 245
witaminy 178
włókno mięśniowe 158
włosy 309
wole tarczycy 326
wrodzone wady serca 231
wskaźnik BMI 191
wszawica 313
wydech 200
wymiana gazowa 201
wyspy Langerhansa 137, 319
wzgórek łonowy 335
wzór Broki-Brugscha 191

Z

zaćma 295
zapalenie
- dróg moczowych 256
- mieszków włosowych 312
- pęcherza 256
- tarczycy Hashimoto 248

zapłodnienie 344
zarodek 348
zawał mięśnia sercowego 143, 230
zęby 181
zespół suchego oka 304
zginacz 165
związki azotowe 250
zygota 344, 347

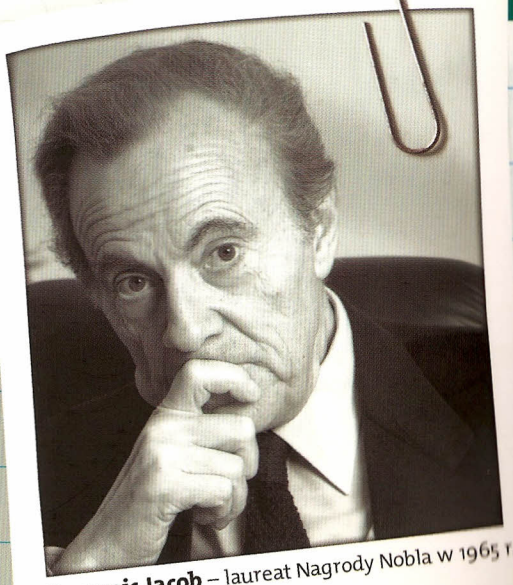
Ż

żebra 154
żołądek 183
żylaki 230
żyły 219

OPERON

Edukacja jest podróżą

Nauczyciel zabrał mnie kiedyś w podróż do świata biologii...



François Jacob – laureat Nagrody Nobla w 1965 r.

Operon otwiera świat najbardziej wartościowych systemów edukacyjnych, które wspierają nauczyciela w jego ponadczasowej misji wychowania i kształcenia

Dla nauczyciela

- *warsztaty i szkolenia*
- *pomoce i materiały dydaktyczne*
- *konferencje*
- *narzędzia do pomiaru dydaktycznego*

Dla ucznia

- *ogólnopolskie egzaminy próbne*
- *podręczniki i inne materiały edukacyjne*
- *konkursy*

Dla szkoły

- *poradnictwo prawne*
- *projekty dotyczące bezpieczeństwa w szkole*
- *wyposażanie pracowni szkolnych i bibliotek*
- *dokumentacja szkolna*

Podróżujmy razem po świecie edukacji!