

## 9. Metabolizm i termoregulacja

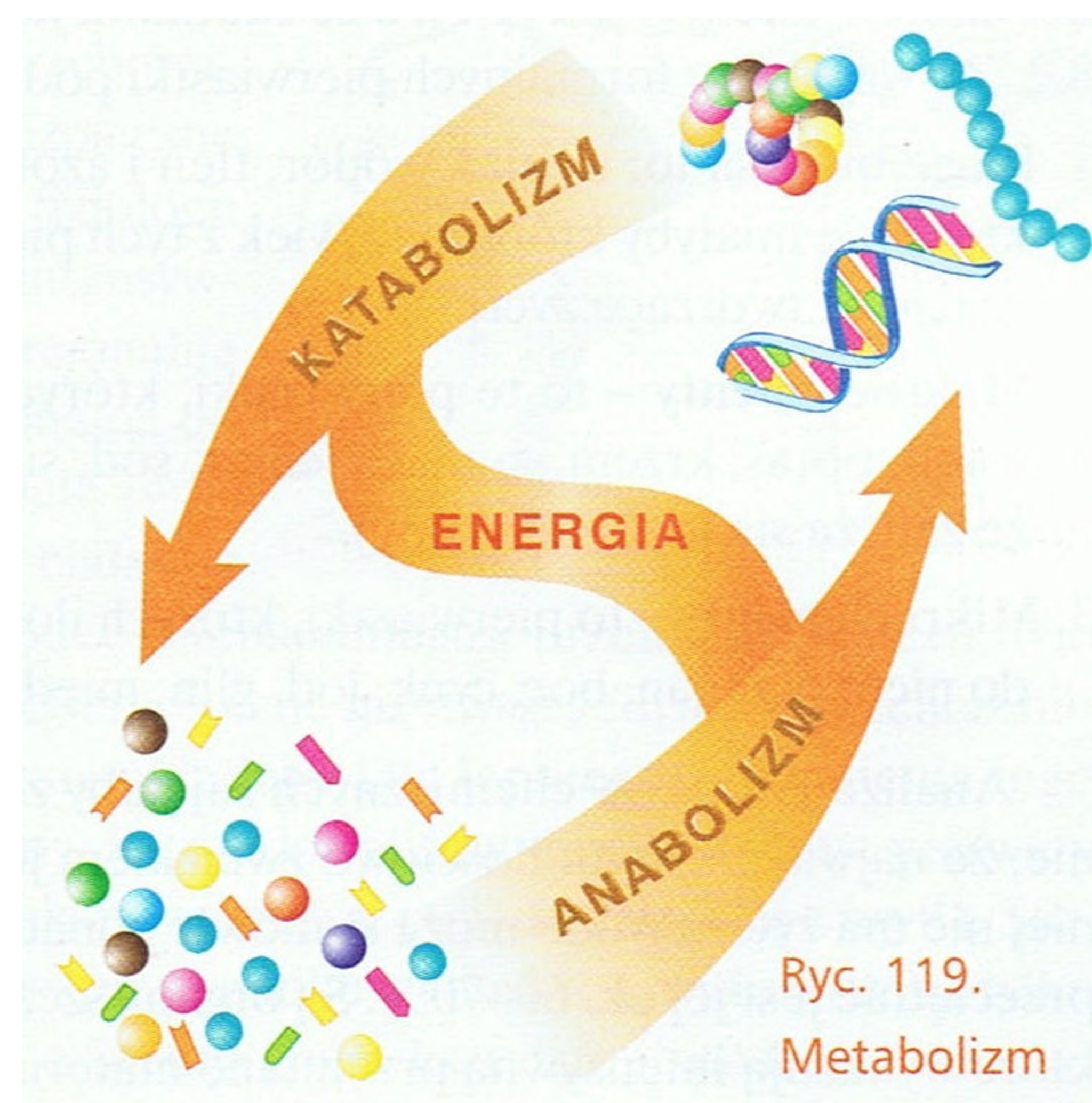
Cechą każdego żywego organizmu jest zdolność do przetwarzania materii i energii. Oznacza to możliwość przeprowadzania różnorodnych, potrzebnych reakcji chemicznych. Całość tych przemian określana jest mianem metabolizmu (od gr. *metabole* przemiana). Należy pamiętać, że każdy organizm jest obiektem fizycznym, działa w konkretnym otoczeniu i podlega wszystkim prawom fizycznym. Dlatego zrozumienie mechanizmów rządzących czynnościami żywych układów wymaga dobrej znajomości opisowej fizyki i chemii. Jeśli traktujesz te przedmioty po macoszemu, to czas najwyższy zmienić przekonania. W tym rozdziale zostaną omówione podstawy przemian biochemicznych jedynie w ujęciu fizjologicznym - problemy natury chemicznej zostaną uproszczone do minimum.

**Uwaga:** Organizmy różni się, czasem bardzo znacznie, możliwościami metabolicznymi. Przykładem niech będzie zdolność fotoautotrofów do przeprowadzania fotosyntezy, ale czynności życiowe roślin nie są przedmiotem analizy w tej książce, (por. CZĘŚĆ I: MOLEKULARNE PODŁOŻE BIOLOGII).

### KAŻDY ŻYWI ORGANIZM MOŻE PRZEPROWADZAĆ RÓŻNORODNE REAKCJE

W klasyczny sposób przemiany biochemiczne zachodzące w żywych organizmach można podzielić na reakcje:

1. Syntezy związków bardziej złożonych z prostszych - nazywa się to anabolizmem (gr. *anaballein* - wkłada, dokłada). Przykładów jest mnóstwo: synteza aminokwasów, cukrów, białek, kwasów nukleinowych itd. Enzymy szlaków anabolicznych pozwalają nam zbudować właśnie takie związki, jakich akurat potrzebne, np. jeśli w pożywieniu jest dużo cukrów, organizm może je przerabiać na tłuszcze. Jeśli warunki zmienią się na niekorzystne i będzie za mało pożywienia, można przekształcić tłuszcze w cukry. Wszystko zależy od sytuacji i możliwości. Reakcje anaboliczne mają charakter endoergiczny - oznacza to, że do ich przeprowadzenia niezbędne jest dostarczenie określonej ilości energii (to tak jak z budowaniem domu z cegieł - sam się nie zrobi; trzeba je zgromadzić, podnieść na określoną wysokość i poukładać, a to wymaga pracy). Spróbuj sobie wyobrazić budowanie czegokolwiek bez stałego nakładu energii, jeśli znajdziesz taki proces napisz - chętnie się poducz.
2. Rozpadu (analizy) związków bardziej złożonych do prostszych - nazywa się to katabolizmem (gr. *kataballein* - odrzuca). Tutaj także można przytoczyć wiele przykładów: „spalanie” biologiczne cukrów, kwasów tłuszczowych, rozkład białek, tłuszczów, kwasów nukleinowych itd. Nasz organizm posiada bardzo różnorodny zestaw enzymów pozwalających na rozłożenie większości substancji organicznych (ale nie wszystkich, por. ROZDZIAŁ 5 - trawienie w ołdru przez uwaczy).





## ANATOMIA I FIZJOLOGIA CZŁOWIEKA

Jeśli zburzysz dom, spadające cegły mogą komu zrobić krzywdę. Z fizycznego punktu widzenia oznacza to, że reakcje kataboliczne są egzoergiczne, czyli w czasie ich zachodzenia uwalniają się energia.

Zwierzęta są bezwytłokowymi **heterotrofami**, czyli nie potrafią zsyntetyzować związków organicznych z nieorganicznych (por. jednak ROZDZ. 5). Oznacza to, że w pożywieniu muszą być substancje organiczne. Te ostatnie możemy jednak dowolnie przekształcać. Zasada ogólna jest prosta - najpierw trzeba coś rozłożyć, aby wydzieloną energią móc złożyć do syntezy czegoś innego (to jest właściwie sprzeczność reakcji endo- i egzoergicznych w ustroju). Wynika to ze starej reguły Hessa, która mówi, że bilans energetyczny jest niezależny od dróg przemian, jeśli tylko substraty i produkty są takie same (przemiany te).

Jednocześnie nieprzeciętne zwierzę, poza budowaniem własnego ciała, potrafi wykonywać inne czynności życiowe wymagające nakładu energii, np. ruszać się, regeneruje (myślenie także wymaga energii!). W tym celu także realizuje przemiany biochemiczne połączone z zamianą form energii, np. zamienia energię chemiczną na pracę mechaniczną w mięśniach.

### CIAŁO ZWIERZĘCIA JEST CHODZĄCĄ TABLICĄ MENDELEJEWĄ

Jednak spośród stukilkudziesięciu znanych pierwiastków tylko nieliczne występują w organizmach w większych ilościach. Pomiędzy nimi jednak, ilość nie jest wykładnikiem znaczenia danej substancji, np. jod, którego jest niewiele w naszym ciele, wchodzi w skład hormonów tarczycy -  $T_3$  i  $T_4$ , a ze skutkami jego niedoboru możemy zapoznać się w ROZDZ.

8.2. Ze względu na formalnych pierwiastki podzielono umownie na:

1. **Biogenne** - są to: węglen, wodór, tlen i azot. Nie znamy białek ani kwasów nukleinowych, które nie miałyby któregoś z tych pierwiastków - stąd to „biogenne” (nieco upraszczając - „tworzące życie”).
2. **Makroelementy** - to te pierwiastki, których ilość w suchej masie przekracza 1%. Są to: wapń, potas, krzem, magnez, chlor, sód, siarka (siarka jest mniej, ale jest ono tak ważne, że zalicza się do tej grupy).
3. **Mikroelementy** - to pierwiastki, których ilość jest mniejsza niż 1% suchej masy. Zalicza się do nich: mangan, bor, cynk, jod, glin, miedź, fluor.

Analiza związków chemicznych zajęłaby zbyt dużo miejsca. Tak więc przypomnijmy jedynie, że najważniejszą ilościowo związką jest woda. Jej rola jest powszechnie znana i bez niej nie ma życia. Woda może stanowić ponad 98% masy całego ciała (u krękopławów), ale przeciętnie jest jej ok. 60-70%. Są organy szczególnie dobrze uwodnione. Zawsze będzie to te, które wykazują intensywne przemiany materii, np. mózg zawiera prawie 88% wody (tak więc nikt nie może zrobić „wody z mózgu”). Wątroba i nerka zawierają ok. 80% wody, natomiast szkielet z kośćmi ma tylko kilka procent (ale to jest chyba zrozumiałe).

Związki organiczne stanowią niezwykle zróżnicowaną grupę. Najistotniejsze są jednak: białka, kwasy nukleinowe, tłuszcze i węglowodany. Związki te stanowią, w dużym uproszczeniu, materiał budulcowy i energetyczny wszystkich komórek (należy tu pominąć kwasy nukleinowe spełniające funkcję genetyczną; por. CZĘŚĆ SC: GENETYKA). Wartość energetyczna związków organicznych nie jest jednakowa. Najmniej energii dostarcza utlenianie węglowodanów (średnio 17 kJ z 1 g), ale są to związki „wygodne w użyciu”, bo łatwo reagują. Tłuszcze dostarczają największą ilość energii (średnio 38 kJ z całkowitego utlenienia 1 g) i są związkami najlepiej nadającymi się na materiały zapasowe. Dzieje się tak, ponieważ nie rozpuszczają się w wodzie i do „niechciane wchodzi w metabolizm”. Wartość energetyczna białek nie jest rewalacyjna (ok. 19 kJ z 1 g), ale na cele energetyczne zużywają się tylko w ostateczności (po-



## 9. Metabolizm i termoregulacja

~v. 1 dlaczego). O wartości energetycznej związku wiadczy współczynnik oddechowy (RQ), który wynika ze stosunku ilości wydzielonego dwutlenku węgla do pobranego tlenu. I tak:

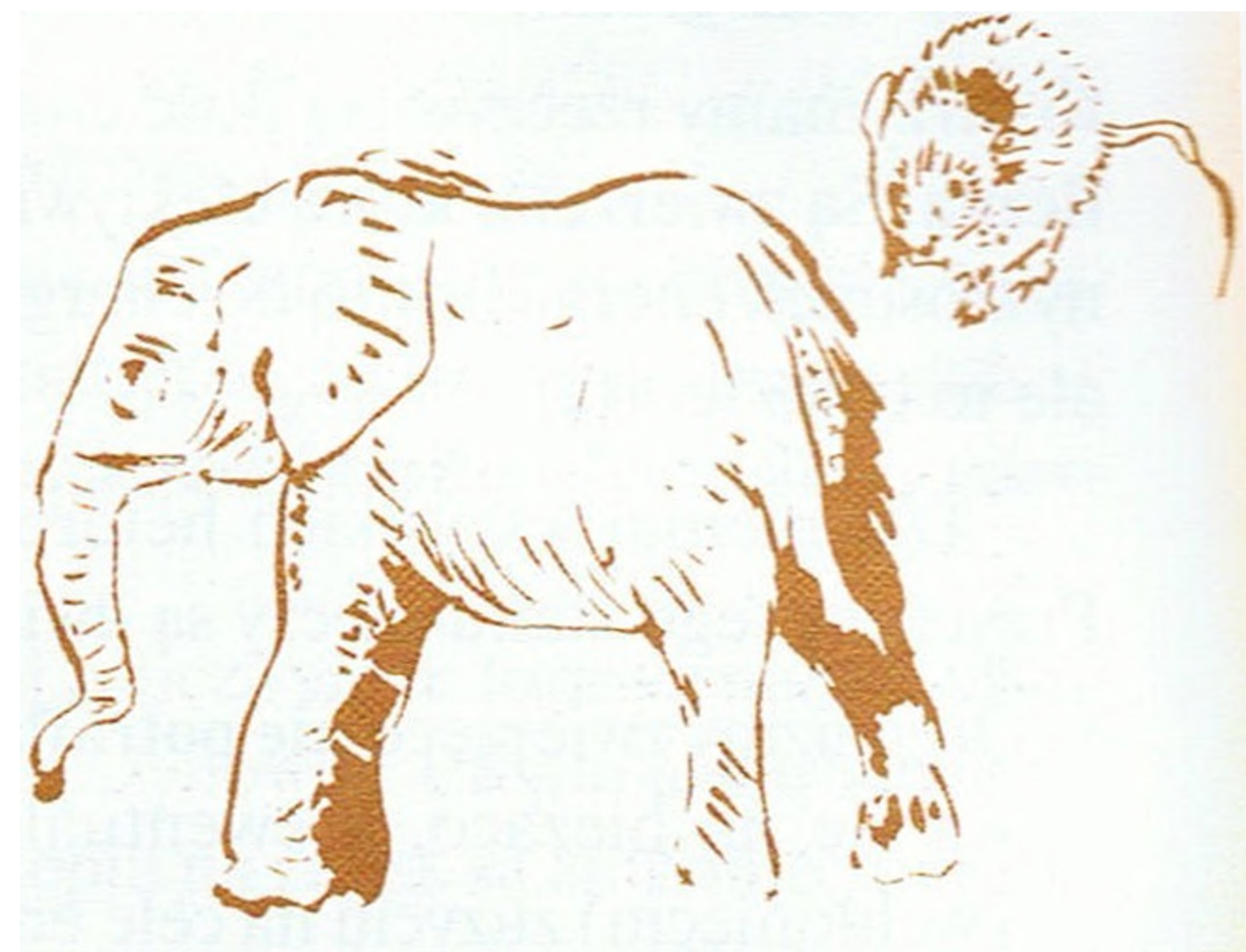
$$RQ = \frac{CO_2}{O_2}$$

- dla 1 mola glukozy (RQ) = 1 (przypomnij sobie reakcję całkowitego utlenienia 1 mola glukozy, gdzie na 6 moli pobranego tlenu wydzielanych jest 6 moli dwutlenku węgla);
- dla 1 mola przeciwnego tłuszczu RQ = 0,7;
- dla 1 mola niewielkiego białka RQ = 0,8.

Tak więc, jeżeli wartość współczynnika RQ < 1, oznacza to, że na wytworzenie 1 mola CO<sub>2</sub> zużyto więcej niż 1 mol O<sub>2</sub>. Praktycznie oznacza to, że wydajność energetyczna takiego procesu.

Zapotrzebowanie zwierzęcia na materię i energię zależy od wielu czynników. Wymieńmy tylko najważniejsze:

- Typ termiczny zwierzęcia** (por. niżej). W zależności od tego, czy zwierzę reguluje własną temperaturę i potrafi ją utrzymać na stałym poziomie czy nie - zapotrzebowanie na nośniki energii różni się bardzo znacznie.
- Wielkość organizmu** - można założyć, że wielkość zwierzęcia będzie miała wielkie bezwzględne zapotrzebowanie pokarmowe niż małe (jest to jednak niebezpieczne uproszczenie - zastanów się dlaczego). W fizjologii znane jest **prawo Rubnera** - mówi ono, że intensywność przemiany materii jest odwrotnie proporcjonalna do masy ciała zwierzęcia, a wprost proporcjonalna do jego powierzchni. Skutek tego jest taki, że małe zwierzę, mając wielką powierzchnię ciała, nie tylko traci więcej energii cieplnej i musi mieć intensywniejszą przemianę materii. Nie oznacza to wcale, że ma mniejsze straty energetyczne niż mysz. Jedynie w przeliczeniu na jednostkę masy proporcje te tak właśnie się układają. Dla lepszego zrozumienia tego problemu posłużmy się modelem. Przyjmijmy, że zbudowali my dwa sześciany: pierwszy o boku 1 cm, a drugi o boku 10 cm (oblicz pole powierzchni i objętość każdej z brył!). Stosunek pola powierzchni do objętości w pierwszym wypadku wynosi 6:1, w drugim już tylko 0,6:1. Gdyby my więc mieli dwa zwierzęta o identycznym kształcie i sposobie życia, to mniejsze musiałoby utrzymywać wielkie tempo metabolizmu ze względu na duże straty ciepła. Stado myszy o masie porównywalnej z jednym słoniem znacznie więcej zje i znacznie więcej tego jedzenia poświęci na utrzymanie stałej temperatury ciała. Jest inny sposób na potwierdzenie prawa Rubnera - małe zwierzęta mają dużo częściej oddechy i szybko pracujące serce (sugeruje to duże zużycie tlenu i wysoki poziom metabolizmu).
- Wiek** - organizm młody, w fazie wzrostu będzie miał wielkie zapotrzebowanie na surowce budulcowe i energię. Zrozumienie tego faktu jest proste - budowanie własnych tkanek (por. punkt powyżej).
- Płeć** - w wypadku człowieka różnica jest dość widoczna: przeciętny mężczyzna w wieku 25-35 lat zużywa (umiarkowanie pracując fizycznie) na dobę ok. 12,5 MJ energii. Kobieta w tych samych warunkach i wieku potrzebuje 9,2 MJ. Ciężka praca oznacza dodatkowy wydatek energetyczny rzędu 350 MJ (przeciętnie dziennie 1,3 MJ).





## 5. Temperatura i wilgotno otoczenia (por. ni ej).

W wypadku zwierz cia stałocieplnego ta ilo energii, któr zu ywa na utrzymanie stałej temperatury, prac serca, ruchy oddechowe i elementarne procesy yciowe, nazywa si przemian podstawow (warunkiem jest przebywanie w optymalnej temperaturze i brak pokarmu w przewodzie pokarmowym). Mo na powiedzie , e przemiana podstawowa (z grubsza = BMR) to „podstawowe koszty utrzymania”. Zwierz zmiennocieplne nie ponosi kosztów utrzymania wysokiej temperatury ciała i dlatego jego przemiana podstawowa jest wyra nie ni sza (np. mo e je raz na tydzie albo rzadziej).

**WARUNKIEM NORMALNEGO FUNKCJONOWANIA KA DEGO ZWIERZ CIA JEST ODPOWIEDNIE ZAOPATRZENIE W POKARM**

Zdajesz sobie zapewne spraw , e nigdy cała energia zawarta w pokarmie (energia brutto) nie jest dost pna dla organizmu. Cz z niej traci si ju we wczesnych etapach pobierania i obróbki po ywienia. Je li wi c od energii brutto odejmiemy zawart w:

- niestrawionych resztkach pokarmowych (por. ROZDZ. 3);
- wydalanych, zb dnych i szkodliwych produktach przemiany materii - trzeba pami ta , e wydalany mocznik czy kwas moczowy maj okre lon warto energetyczn (np. ten pierwszy 45 kJ/gram);

to otrzymamy rzeczywist ilo energii, któr ustrój przyswoił. Nazywa si j energi metaboliczn . S zwierz ta, które efektywnie wykorzystuj pokarm, np. ssaki. Maj wi c one korzystny stosunek energii brutto do energii metabolicznej (idealne zwierz miałyby współczynnik =1, ale to tylko teoria).

Dla niemal wszystkich heterotrofów krytycznym składnikiem pokarmowym s białka. Przyczyny tego stanu rzeczy s dwie:

1. Organizmy zwierz ce nie potrafi magazynowa białek. Przetwarzanie tych zwi zków odbywa si na bie co, a ewentualna nadwy ka zawarta w pokarmie ulega (po strawieniu i wchłoni ciu) zu yciu na cele energetyczne. Oznacza to utlenianie nadwy ki aminokwasów w procesach oddychania wewn trzkomórkowego lub przerabiania ich na cukry i tłuszcze.
2. Wi kszo zwierz t nie potrafi samodzielnie wytwarza wszystkich rodzajów aminokwasów. Te, które mo e zbudowa z dost pnej puli zwi zków organicznych, nazywa si aminokwasami endogennymi, natomiast te, które musz zosta dostarczone z pokarmem - aminokwasami egzogennymi (por. tab. 2). W zwi zku z tym białka pokarmowe podzielono na:

- A) Pełnowarto ciowe - zawieraj wszystkie aminokwasy egzogenne w odpowiedniej ilo ci. Do takich protein zalicza si np. aktyn i miozyn z mi sa, owoalbumin z jaj kurzych, laktoalbumin z mleka ssaków czy glutelemin z m ki kukurydzianej (zwró uwag na mały udział białek pochodzenia ro linnego - zwykle zawieraj one minimalne ilo ci aminokwasów tzw. siarkowych; por. ni ej);

ENDOGENNE	EGZOGENNE
1. alanina	✓ 1. lizyna
2. asparagina	✓ 2. metionina
3. asparaginian	✓ 3. leucyna
4. arginina	✓ 4. histydyna
5. glutaminian	✓ 5. fenyloalanina
6. glutamina	✓ 6. treonina
7. glicyna	✓ 7. tryptofan
8. prolina	✓ 8. izoleucyna
9. seryna	✓ 9. walina
10. tyrozyna	
11. cysteina	

Tab. 2.

Podział aminokwasów na egzo- i endogenne (dotyczy człowieka). Wg Stryera cysteina zaliczana jest do endogennych, inne ródła okre laj j jako zwi zek egzogenne.



**B) Niepełnowartościowe** - mają skład uboższy o pewne aminokwasy. Najczęściej są to proteiny roślinne, np. legumina z grochu (mało cystyny), zeina z kukurydzy (mało lizyny i tryptofanu).

Za pełnowartościowy pokarm przyjmuje się taki, który zawiera wszystkie składniki w odpowiedniej ilości (aminokwasy egzogenne, witaminy, mikroelementy, związki budulcowe i energetyczne). Musisz jednak mieć wiadomości, że różne zwierzęta mają nieco odmienne możliwości metaboliczne. Swoistym dziwakiem jest człowiek, który do normalnego funkcjonowania wymaga obecności w pokarmie np. witaminy C. Oprócz niego jedynie małpy i winka morska nie potrafią syntetyzować kwasu askorbinowego (por. ROZDZ. 5). Do tego, z 20 podstawowych aminokwasów nasz organizm sam buduje tylko połowę. Dla innych zwierząt lista związków egzogennych jest znacznie krótsza - i jak to się ma do naszego przekonania o doskonałości człowieka? Trzeba tu jeszcze dodać pewien niekorzystny skutek metaboliczny braku choćby jednego aminokwasu egzogennego - organizm nie może budować wówczas potrzebnych białek i marnuje białka pokarmowe (zachowuje się jak radykał - albo białko miało wszystko, albo nie wcale niczego i zginie).

### PRZEMIANY ENERGII W ORGANIZMACH ZAWSZE MAJĄ JAKIŚ ZWIĄZEK Z CIEPŁEM

Zasady termodynamiki znasz - wiesz więc, że energia ani nie powstaje, ani nie ginie, natomiast może ją przekształcać. Kiedy żywy organizm wykorzystuje tę możliwość na własne potrzeby, ale różne formy energii mają dla niego nieporównywalną wartość:

1. **Energia wysoko użyteczna biologicznie** - tutaj zalicza się te formy energii, którymi organizm może do swobodnie operować. Praktycznie oznacza to, że może je przekształcać i magazynować w dowolnym miejscu i czasie. Taką energią jest **wiatło** (dla roślin) i **energia chemiczna** (dla wszystkich organizmów żywych).
2. **Energia o ograniczonej użyteczności biologicznej** - tutaj zalicza się te formy energii, które trudno przekształcać i prawie (lub wcale) nie można magazynować. **Ciepło** jest właśnie takim rodzajem energii - nasze zdolności gromadzenia ciepła na zapas są znikome, a możliwości ogrzania wybranego, pojedynczego palca u nogi energią cieplną wydzielaną przez wąż jest żadna. Paradoksalnie jednak warunkiem życia jest ciepło - organizmy żywe występują bowiem tylko tam, gdzie **temperatury środowiskowe pozwalają im realizować metabolizm**. Przyjmuje się, że temperatura ciała nie może być niższa niż  $-2^{\circ}\text{C}$  jest tzw. dolna temperatura ograniczająca życie, natomiast za górną przyjmuje się  $+50^{\circ}\text{C}$ . Nie oznacza to jednak, że zasada ta jest sztywna - w Oceanie Lodowatym żyje głębinowa ryba z rodzaju *Trematomnus*, której temperatura ciała wynosi  $-1,8^{\circ}\text{C}$ . To nieco poniżej punktu zamarzania wody, a dla czego woda się nie zestala i lód nie rozerwie komórek, zastanów się i odpowiedz sobie. W Sudanie (Afryka) występuje niewielki skorupiak z rodzaju *Tops*, którego jaja w porze suchej zagrzebane są w wyschniętym mulu o temperaturze dochodzącej do  $-1-80^{\circ}\text{C}$ . Żeby było ciekawiej, jeżeli wspomnianych wcześniej ryb przeniesiemy do wody o temperaturze  $+5^{\circ}\text{C}$  umrą z przegrzania (!), natomiast temperatura otoczenia  $+50^{\circ}\text{C}$  dla jaj *Topsa* jest zbyt niska (nie będą się rozwijały!). Przedstawione przykłady są jednak wyjątkami - zwierzęta giną w temperaturach mniej skrajnych.

**Uwaga:** Niektóre zwierzęta mogą stale przebywać w temperaturach niższych niż  $0^{\circ}\text{C}$  bądź wyższych niż  $+50^{\circ}\text{C}$ , jednak są to organizmy albo stałocieplne, albo aktywne jedynie okresowo (znajdź przykłady!). W każdym razie zwierzęta białe funkcjonują dopóty, dopóki temperatura środowiskowa nie obniży się (albo podwyższy) poza granice krytyczne temperatury jego ciała.

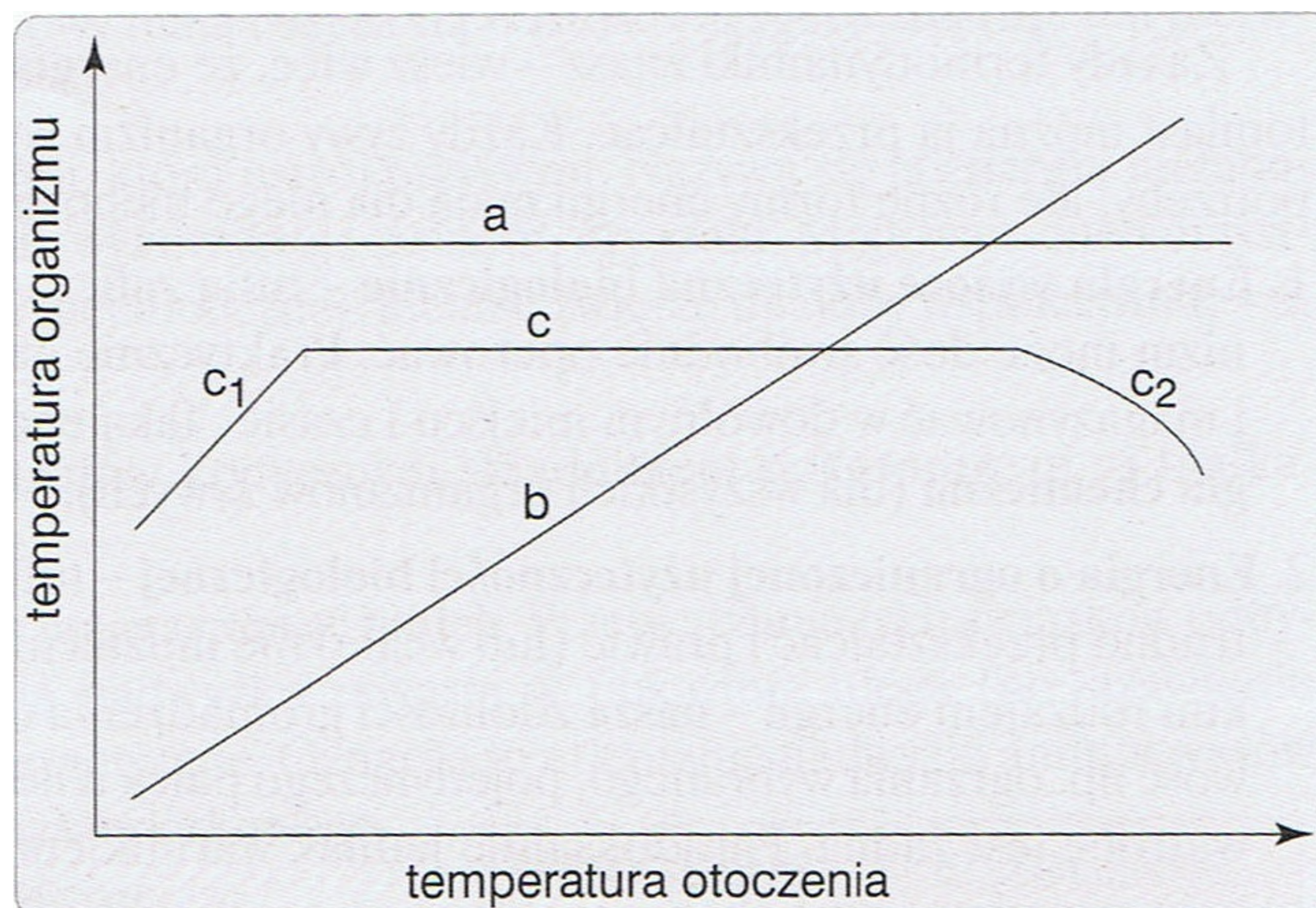


Zwierzęta znacznie różnią się tolerancją na zmiany temperatury środowiska. Dlatego dzieli się je na:

1. **Eurytermy** - znoszą one znaczne wahania temperatury środowiska.
2. **Stenotermy** - wymagają one, by zmiany temperatur środowiskowych były niewielkie - stale « niskie lub stale wysokie.

Temperatura ciała każdego zwierzęcia jest wynikiem bilansu:

1. „**Podaj**” **ciepła** - powstaje ono w czasie przemian katabolicznych w ustroju lub jest dostarczane ze środowiska.
2. **Strat ciepła** - jeżeli otoczenie ma niższą temperaturę niż ciało zwierzęcia, to w naturalny sposób rozchodzi się ono przez:
  - A) **Skór** - w wyniku promieniowania, przewodnictwa i (w wypadku ssaków) pocenia się ;
  - B) **Układ oddechowy** - w wypadku płucodysznych przez par wodną z wydychanym powietrzem lub, jak u skrzelodysznych, przez schładzanie wody ;
  - C) **Układ pokarmowy** - z masami kałowymi;
  - D) **Układ moczowy** - u ssaków wraz z moczem.



Ryc. 120.

Krzywe ilustrują one podstawowe zależności termiczne (a - stałocieplnych, b - zmiennocieplnych, c - przemienocieplnych, c<sub>1</sub> - hibernacja, c<sub>2</sub> - estywacja)

Część zwierząt utrzymuje stałą wysoką temperaturę ciała przez cały rok mimo zmian temperatur środowiskowych - nazywa się je **stałocieplnymi** (homeotermami, homoiootermami; por. ryc. 120 a). Zalicza się do nich jedynie ssaki, ptaki i część dinozaurów. Problem stałocieplności tych ostatnich budzi kontrowersje. Wydaje się jednak, że przynajmniej część z nich mogła być homeotermami. Szczególnie duże dinozaury i dowe. Można skonfrontować to z filmem *Spielberga Park Jurański*, ale najlepiej przeczytać niesamowitą książkę M. Ryszkiewicza *Mieszkańcy wiatów alternatywnych*.

Wbrew pozorom zdefiniowanie stałocieplności nie jest takie proste. Nie istnieją bowiem zwierzęta o idealnie stałej temperaturze. W dłuższej skali czasowej zawsze pojawi się jakieś odchylenie od wartości przeciętnej, np. spowodowane stanami chorobowymi, niedożywieniem czy owulacją. W tej sytuacji za granicę stałocieplności przyjmuje się arbitralnie (z góry) uważa się zmiany temperatury ciała nie większe niż 4°C w skali roku, pomimo iż temperatury środowiskowe wykazują znacznie większe wahania.

Pozostałe zwierzęta nie potrafią sprawnie regulować temperatury i nazwano je **zmiennocieplnymi** (poikilotermami; por. ryc. 120 b). Ich ciepłota zmienia się tak, jak zmienia się temperatura otoczenia. Nie ponoszą więc wysokich kosztów utrzymania stałej temperatury, ale płacą



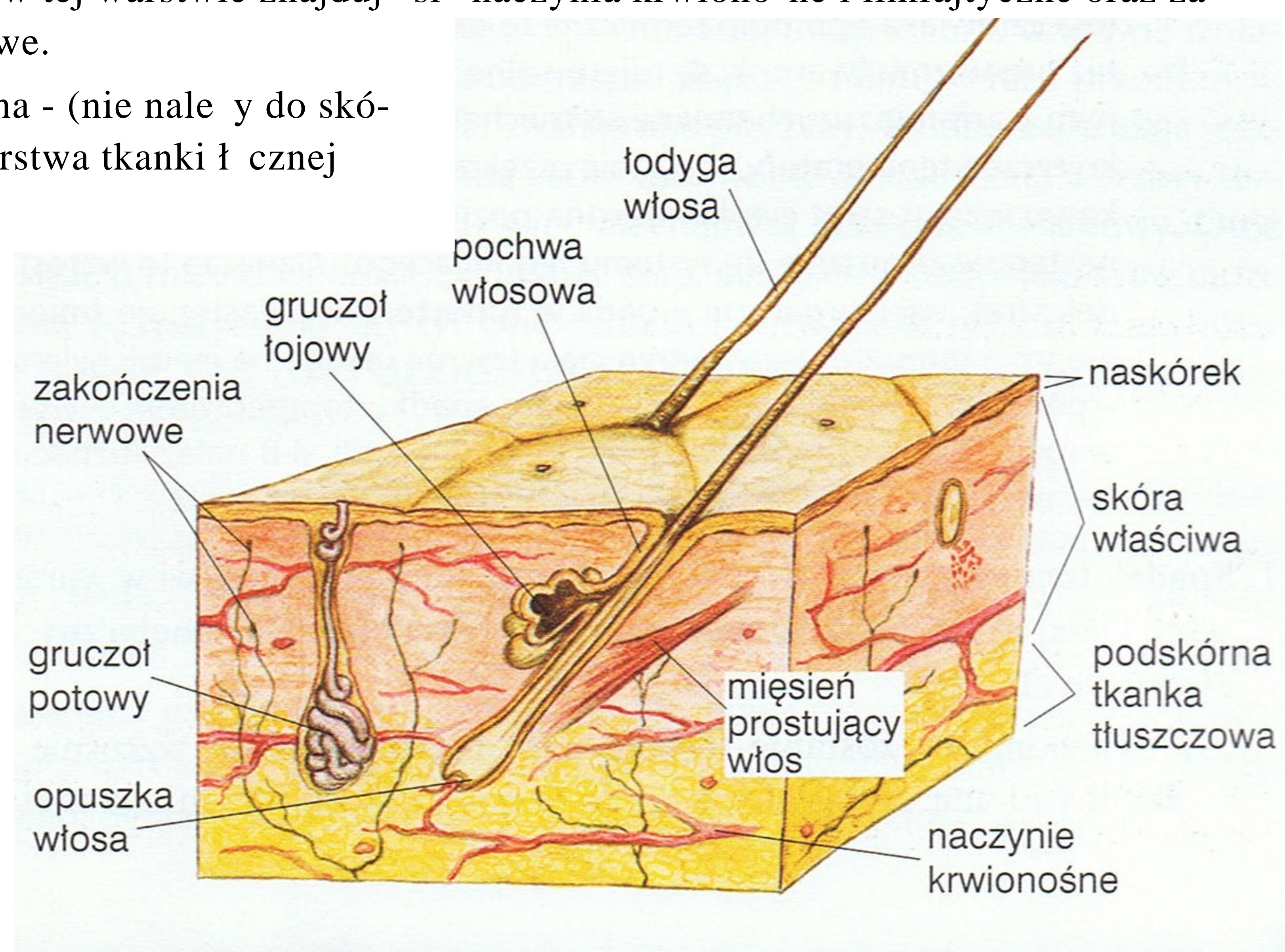
za to spadkiem tempa metabolizmu i sprawno ci ruchowej w niskich temperaturach. Do tego dochodzi ryzyko szybkiego przegrzania w temperaturach wyższych niż optymalne. Oczywiście pojawi się natychmiast problem np. ryb głębinowych o wybitnie stałej temperaturze ciała, spowodowanej niską, lecz praktycznie niezmienną temperaturą wody. Niektóre tropikalne gady w dobowej aktywności utrzymują taką stałą ciepłotę - w umiejętny sposób nagrzewają się w słońcu i schładzają w cieniu (można to nazwać termoregulacją etologiczną - wynikającą z zachowania się). Jednak te organizmy zapewniają stabilną (czasem nawet wysoką) temperaturę warunkom środowiskowym - ciepło dostarczane z zewnątrz. Dlatego zalicza się je do egzotermów. W tych warunkach ptaki, ssaki i dinozaury należą i uznawane za zwierzęta endotermiczne (wewnętrznie stałocieplne). Jednak i niektóre zwierzęta trudno zakwalifikować do stało- lub zmiennocieplnych, ponieważ przez jakiś czas wykazują cechy tych pierwszych, kiedy indziej drugich. Dlatego nazwano je przemiennocieplnymi (heterotermami; por. ryc. 120 c). Małe kolibry w ciągu dnia są stałocieplne, ale w nocy muszą obniżyć swoją ciepłotę, gdy nie byłyby w stanie „produkować” tak dużej w stosunku do powierzchni ilości ciepła. Niektóre ssaki (nie wiadomo, nietoperze, wiewiórki, chomiki, susły) okresowo zapadają w stan odrętwienia, połączone ze spadkiem temperatury ciała i zwolnieniem tempa metabolizmu. Jeżeli dzieje się to zimą, mówimy o hibernacji (nie zimowym; por. ryc. 120 Cj), jeżeli latem, to o estywacji (nie letnim; por. ryc. 120 c.). Uwaga się, że w ten sposób organizmy te oszczędnie gospodarują energią w czasie, gdy jest ona trudno dostępna. Oczywiście inne są przyczyny braków pokarmowych zimą, a inne latem (pomyśl jakiej). Specjalnym przystosowaniem do niskich temperatur jest termoregulacja socjalna - osobniki w grupie przytulają się do siebie, można więc powiedzieć, że wzajemnie się ogrzewają. Tak naprawdę tylko zmniejszają powierzchnię strat ciepła, ale korzyści są ogromne - przykładem mogą być pingwiny lub psy husky.

Powłoką ciała zwierząt stałocieplnych stanowi skóra, pełniąc funkcję termoregulacyjną i ochronną.

#### SKÓRA KRĘGOWCÓW WYKAZUJE WYRAŹNIE WARSTWOWY BUDOW

W skórze wyróżnia się (por. ryc. 121) następujące warstwy:

1. Naskórek - zbudowany z komórek nabłonka wielowarstwowego płaskiego. Najbardziej zewnętrzna warstwa naskórka ulega ciągłemu łuszczeniu.
2. Skóra właściwa - w tej warstwie znajdują się naczynia krwionośne i limfajtyczne oraz zakończenia nerwowe.
3. Warstwa podskórna - (nie należy do skóry!) tworzy ją warstwa tkanki łącznej i tłuszczowej.

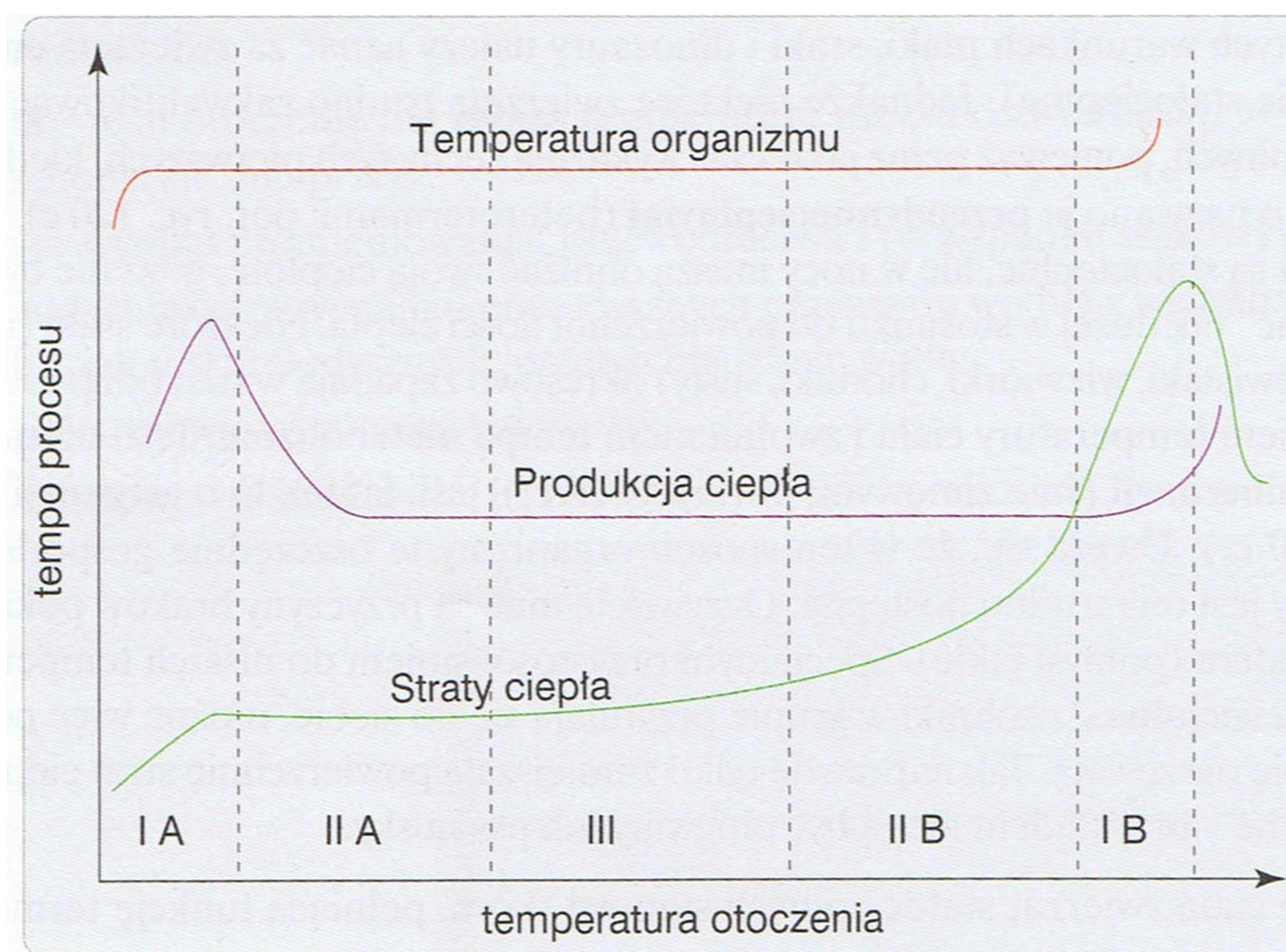


Ryc. 121.  
Schemat budowy skóry ssaka



**U HOMEOTERMOW STAŁA TEMPERATURA CIAŁA JEST NIEODZOWNYM WARUNKIEM NORMALNEGO EWOLUCYONOWANIA ORGANIZMU**

Utrzymywanie stałej temperatury ciała wymaga wytworzenia specjalnych mechanizmów. Jako charakterystyczny przykład zostanie tutaj omówiony człowiek - typowy stałocieplny ssak » tropikalny. Opisane poniżej serwomechanizmy (układy wspomagające) występują praktycznie u wszystkich kręgowców stałocieplnych. Przebieg reakcji naszego organizmu na spadek (1) i wzrost temperatury (2):



Ryc. 122. Zależności pomiędzy temperaturami środowiskowymi a mechanizmami termoregulacyjnymi u stałocieplnych. Na dolnej osi przedstawiono zakresy temperatur środowiskowych: I A - niskie, krytyczne dla organizmu (przy takich temperaturach następuje wzrost produkcji ciepła, ale przy dłuższym przebywaniu produkcja ciepła załamuje się, organizm wpada w hipotermię i ginie); II A - temperatury środowiska są niższe niż ciała (warunki są tolerowalne, wzrasta produkcja ciepła); III - strefa komfortu termicznego - w niej koszty utrzymania są najniższe, ponieważ produkcja i straty ciepła są znikome (dla człowieka optimum termiczne to ok. 25°C); II B - temperatury środowiska są wyższe niż organizmu (warunki są tolerowalne, produkcja ciepła utrzymywana jest na minimalnym poziomie, uruchamiają się mechanizmy wzmagające straty ciepła); I B - wysokie, krytyczne temperatury, wyraźnie przekraczające możliwości adaptacyjne układu (początkowo wzrost strat ciepła i obrona poziomu metabolizmu, przy dłuższym przebywaniu następuje załamanie się systemu regulującego). Oznacza to wzrost produkcji ciepła, spadek strat, więc organizm wpada w hipertermię i następuje śmierć z przegrzania. Krzywe to: - temperatura wnętrza ciała (zwróć uwagę na jej odchylenia w strefach I A i I B), - produkcja ciepła (wzrasta w miarę spadku temperatury), - wytracanie ciepła (rośnie w miarę wzrostu temperatury). Obszary II A, III, II B należy uznać za warunki tolerowalne, natomiast I A i I B za pessima, w których grozi śmierć.

**1. Spadek temperatury** spowoduje obniżenie temperatury krwi w warstwach powierzchniowych ciała, to zaobudzi **podwzgórzowy ośrodek termogenetyczny**, który spowoduje następujące efekty:

A) Uruchomiona zostanie **termogeneza bezdrzewniowa** - wzrost wytwarzania ciepła.

BMR (od ang. *Basal Metabolic Rate* podstawowa przemiana metaboliczna, która jest



skutkiem czynności wszystkich komórek organizmu, a w spoczynku głównie w troy; por. ROZDZ. 3.3) zostanie przyspieszona na skutek pobudzenia **układu współczulnego**. Rdze nadnerczy odruchowo wydziela **noradrenalin**, która wywołuje wzrost metabolizmu mi ni poprzecznie pr kowanych i tkanki tłuszczowej. Ponadto do krwi wyrzucana jest adrenalina, przyspieszaj ca oddychanie wewn trzkomórkowe w w trobie i mi niach, rozkład tłuszczów w tkance tłuszczowej oraz [3-oksydacj w w trobie i mi niach. Pod wpływem przysadkowego ACTH kora nadnerczy wydziela **glikokortykoidy** (przyspieszaj rozpad zwi zków organicznych w w trobie). Wszystkie te procesy biochemiczne zachodz z wydajno ci rz du 40% - pozostała cz „idzie w ciepło”. Dłu sze przebywanie w niskich temperaturach pobudza tarczyc do wydzielania **trójjodotyroniny** ( $T_3$ ) i **tyroksyny** ( $T_4$ ), które pobudzaj metabolizm wewn trzkomórkowy (por. ROZDZ. 8.2). Teraz ju chyba rozumiesz, dlaczego Eskimosi maj wy szy poziom tych hormonów ni my;

- B) Rozpocznie si **ruch mi ni szkieletowych** - cz energii chemicznej zamienianej na prac w mi niach jest zawsze tracona jako ciepło. Organizm zwierz cia wykorzystuje ruch dla ogrzania własnych tkanek, wówczas to układ mi niowy jest głównym dostarczycielem ciepła. Niekoniecznie musi to by ruch lokomotoryczny, o czym wie chyba ka dy, kto kiedy trz sł si z zimna. Te drobne, mimowolne ruchy mi ni, przy okazji których wydzielane jest ciepło, s odpowiedzialne za **termogenez dr eniow**. S efektem uaktywnienia o rodka dr enia mi ni w ród mózgowiu;
- C) Organizm uruchomi **mechanizmy naczynioruchowe**, ograniczaj ce straty ciepła - pobudzony o rodek naczyniowy zw zi naczynia powierzchniowe (tu: skóry), rezygnuj c z ogrzewania zewn trznych partii ciała (zmniejszenie przekroju naczy powierzchniowych powoduje zmniejszenie przepływu krwi przez skór - krew nie b dzie ozi biana; por. tak e poni ej).

Zbyt niska temperatura rodowiska doprowadzi do hipotermii i mierci z niedogrzenia (por. ryc. 122 strefa I A);

**Uwaga:** Człowiek posiada jedynie szcz tkowe owłosienie ciała, ale inne ssaki nie. W omawianej sytuacji nastrosz wi c sier (**mechanizm pilomotoryczny**). Podobnie mog uczyni ptaki, z tym e one strosz pióra (**mechanizm pteromotoryczny**). W obu tych wypadkach chodzi o pogrubienie poduszki powietrznej uwi zionej w warstwie izolacyjnej (a powietrze jest słabym przewodnikiem ciepła!). Dlatego nasi przodkowie w swoich niedogrzanych domach preferowali grube pierzyny! Wodne ssaki maj jeszcze wi kszy problem - ich nieowłosiona skór nie tworzy dostatecznej warstwy termoizolacyjnej. Zwierz ta te rozwin ły wi c mechanizm naczynioruchowy. Otó prawie wszystkie t nce dochodz ce do skóry maj **anastomozy**, którymi krew mo e by kierowana bezpo rednio do ył (nie schładza si wi c w skórze; por. tak e CZ : CYTOLOGIA I HISTOLOGIA, ROZDZ. 9.2). Dodatkowo funkcj izolacyjn spełnia gruba warstwa tkanki tłuszczowej.

2. **Wzrost temperatury otoczenia** powy ej ciepłoty ciała homeoterma spowoduje ogrzanie krwi w warstwach powierzchniowych - doprowadzi to do pobudzenia **podwzgórzowego o rodka eliminacji ciepła**. Ostatecznie organizm wzmo e aktywne i pasywne mechanizmy zwi kszej ce straty ciepła:

- A) Nast pi wzrost tempa pracy serca, pogł bienie oddechów i rozszerzenie naczy w skórze - straty ciepła wzrosn przez schładzanie powierzchniowych warstw skóry. Wydychanie wilgotnego, ogrzanego powietrza i wdychanie bardziej suchego i chłodniejszego



ma także swoje znaczenie. U ssaków pozbawionych gruczołów potowych oraz ptaków rozwinięty jest mechanizm **ziania** (intensywnego dyszenia). U niektórych ssaków, np. u psa towarzyszy temu intensywne linienie sierści. Te zwierzęta, które posiadają gruczoły potowe, wydzielają ciepły pot (proces jest kontrolowany na drodze odruchowej przez AUN). Człowiek ma od 2 000 gruczołów potowych na 1 cm<sup>2</sup> (na dłoniach i stopach), do 200/cm<sup>2</sup> na klatce piersiowej. Wystarcza to do wytracenia nawet 1 l potu/godzin (łącznie ze stratami wody z płuc). Dlaczego ten mechanizm jest tak ważny? Otóż woda ma bardzo duże ciepło właściwe i wydzielanie jej z przegrzanego organizmu skutecznie zmniejsza ilość ciepła w układzie. Znacznie trudniejsza sytuacja panuje w warunkach pustynnych. Ze względu na wysoką temperaturę i niską wilgotność powietrza organizm musi tracić dużo wody - jeżeli więc jej zabraknie, skutek łatwo przewidzieć. Przegrzanie jest szczególnie niebezpieczne dla gadów - poziom ich metabolizmu w wysokiej temperaturze bardzo wysoki, a więc produkcja ciepła także. W tych warunkach sucha, pozbawiona gruczołów skóra staje się termiczną pułapką - nie pozwala na zwiększenie strat ciepła (por. wyżej - termoregulacja etologiczna);

- B) Nastąpi zmniejszenie grubości warstwy termoizolacyjnej - przez połośnienie włosów albo piór;
- C) Orodkiem hamującym dręmiennymi (w mózgu) zatrzyma termogenezę dręmienną, na dłuższą metę nastąpi spadek wydzielania hormonów tarczycowych (por. wyżej).

Jeżeli warunki pogorszą się, może dojść do złamania zabezpieczeń termicznych - **hipertermii** i śmierci z przegrzania (por. ryc. 122 strefa I B).

### ORGANIZMY STAŁOCIEPLNE WYBLISKO GÓRNEJ GRANICY TEMPERATURY LETALNEJ

Zanalizujmy teraz zalety i wady stałocieplności:

#### 1. Wady:

- A) Duże zapotrzebowanie pokarmowe - zwierzęta mają często kłopoty ze zdobyciem dostatecznej ilości surowców energetycznych i cechuje je mała odporność na długotrwałe głodowanie;
- B) Straty czasu poświęconego na zdobycie pożywienia - szczególnie u mięsożerców;
- C) Normalne temperatury ciała są bardzo wysokie (szczególnie u małych, aktywnych homeotermów). W wypadku ssaków wynoszą średnio +38°C, natomiast u ptaków +41°C. U człowieka w pomiarze raktalnym (w odbytnicy) +36,8°C lub +36,6°C (mierzone mniej dokładnie pod pachą). Wzrost temperatury komórek o nieco ponad 3°C uszkadza ich organella - szczególnie delikatny jest zawsze **mózg**. Takie wysokie, niebezpieczne temperatury stałocieplnych stara się wyeliminować **hipoteza maksitermii** (por. niżej - 2. Zalety);
- D) Utrzymanie stałej temperatury wymaga stworzenia precyzyjnych ośrodków kontrolnych, regulujących zarówno „produkcję”, jak i straty ciepła. Już zapewne wiesz, że homeiotermy mają **dwuczłonowy, podwzgórzowy ośrodek termoregulacyjny**. Jego normalne funkcje opisano wyżej. Pytanie brzmi tylko: skąd on „wie”, jaka temperatura ciała jest właściwa? Otóż stopniowo aktywności obu ośrodków zależy od niewielkich zmian stężenia jonów wapnia i sodu w podwzgórzach (stosunek wapniowo-sodowy). Wzrost stężenia jonów sodowych przestawia go „na produkcję ciepła”. Taki efekt wywołują **związki pirogenne** (gorączkotwórcze). Zalicza się do nich prostaglandyny (por. ROZDZ. 8.2) i interleukiny (wydzielane przez komórki układu odpornościowego). Ze-



## 9. Metabolizm i termoregulacja

w trzpochnodne zwi zki wywołuj ce stany gor czkowe nazywa si ogólnie egzopiroge-  
nami. Przykładem mog by toksyny bakteryjne, które rozkładaj krwinki białe (głów-  
nie neutrofile), z nich za uwalniane s wspomniane interleukiny i gor czka jest gotowa.  
Znany zapewne wszystkim przeciwwgor czkowy lek *Pyramidonum* hamuje wytwarzanie  
prostaglandyn (jego działanie przy dłu szym stosowaniu mo e mie skutki uboczne  
i nale y go stosowa tylko dora nie!).

2. **Zalety**, chocia s nieliczne, to jednak trudne do przecenienia:

- A) Szybkie tempo przemian metabolicznych mo liwe do osi gni cia w temperaturze bliskiej  
górnj letalnej (hipoteza maksitermii) **zapewnia pełn , ci gł gotowo wszystkich ukła-  
dów do działania**. W pewnym uproszczeniu mo na to porówna do sytuacji dwóch kie-  
rowców maj cych si wła nie ciga . Tyle e jeden ma wł czony i podgrzany silnik, a drugi  
nie. Do tego tylko ten pierwszy ma chłodnic . Nietrudno zgadn , który szybciej ruszy,  
pr dzej osi gnie wymagana pr dko , a komu pr dzej zatrze si silnik. Po prostu w przy-  
rodzie warto czasem zapłaci za utrzymanie organizmu w stanie wysokiej gotowo ci;
- B) Aktywno zwi zcia jest **niezale na** od pory roku (gdyby my byli zmiennocieplni,  
z wyj tkiem tropików, musieliby my zasypia na zim - wytworzenie w tym układzie cy-  
wilizacji wydaje si w tpliwe).

**Uwaga:** Zdolno organizmu do obrony własnej temperatury zale y tak e od jego wielko ci,  
wieku i **aktualnej kondycji**.