

# Dlaczego układ ustaleniowy jest charakterystyczny tylko dla konia?

**Maria Soroko**

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

W odpowiedzi na zmieniające się warunki środowiskowe podczas wędrówki z Ameryki Północnej do Europy koniowate przechodziły naturalną selekcję, ulegając powolnym zmianom w budowie anatomicznej. Jednym z mechanizmów wytworzonych w procesie ewolucji był układ ustaleniowy. Układ ten jest strukturą anatomiczną, charakterystyczną tylko dla koniowatych. Jego funkcją jest ograniczenie wydatku energetycznego podczas spoczynku i ruchu zwierzęcia. Mechanizm ten nie pojawił się u innych ssaków kopytnych, mimo że na przestrzeni wieków były one poddane podobnym wpływom zmieniającego się środowiska naturalnego, m.in. warunkom zdobywania pokarmu czy ucieczki przed drapieżcą.

## Funkcje i anatomia układu ustaleniowego

Konie są dużymi, ciężkimi ssakami nieparzystokopytnymi, które dla utrzymania masy ciała wymagają silnej struktury mięśniowo-ścięgnowej. Jednym z mechanizmów układu mięśniowo-ścięgnowego jest układ ustaleniowy. Składa się on z mięśni, ścięgien i więzadeł, które zamykają główne stawy kończyn piersiowych i miednicznych, aby przeciwdziałać szybkiemu męczeniu się mięśni. Jest to ewolucyjny postęp, który zwiększa wytrzymałość zwierzęcia, pozwalając na zaoszczędzenie zużycia energii podczas odpoczynku w pozycji stojącej. Jest również wykorzystywany podczas przemierzania dużych odległości w poszukiwaniu wody i pokarmu.

Unikalna właściwość układu ustaleniowego wynika z budowy kończyn utrzymujących biernie ciężar ciała i nie dopuszczających do zmiany w stosunkach kątowych kończyn. Układ ten zastępuje pracę mięśni pracą ścięgien, rozciągien, więzadeł i powięzi, czyli struktur słabiej unaczynionych i znacznie trudniej podlegających procesowi zmęczenia. Układ zabezpiecza również przed ruchem zginania stawów: ramiennego, łokciowego, nadgarstkowego, kolanowego, stępu, pęcಿನowego oraz koronowego.

## Układ ustaleniowy kończyny piersiowej powyżej stawu nadgarstkowego

Głównym mięśniem unoszącym ciężar części kończyny piersiowej jest mięsień zębaty dobrzuszny, zbudowany z tkanki ścięgnistej. Jego tylna część to mięsień zębaty dobrzuszny klatki piersiowej (*m. serratus ventralis thoracis*), który łączy tułów z łopatką, bez angażowania do pracy tkanki mięśniowej.

Mięsień dwugłowy ramienia (*m. biceps brachii*) jest dominującą strukturą zapobiegającą ruchowi zginania stawu ramiennego. Aby zapewnić stabilizację stawu, mięsień dwugłowy ramienia zbudowany jest z tkanki ścięgnistej. Głowa mięśnia ma przyczep na guzku nadpanewkowym łopatki (*tuberculum supraglenoideale*), tworząc ścięgnistą kaletkę przebiegającą przez guzek pośredni (*tuberculum intermedium*) części główki kości ramiennej. Przyczep końcowy znajduje się na wysokości bliższego końca kości promieniowej. Przebieg przez główkę kości

ramiennej i przymocowanie do kości promieniowej tworzy napięcie w mięśni dwugłowym ramienia, zabezpieczając przed ruchem zginania stawu ramiennego. Napięcie to może być stworzone tylko wtedy, gdy staw łokciowy jest zabezpieczony przed ruchem zginania [3]. Dzieje się to dzięki skurczowi izometrycznego mięśnia trójgłowego oraz ramiennemu przymocowaniu obu zginaczy – mięśnia zginacza głębokiego i powierzchniowego palca [3, 10]. Zginacze te mają przyczepy na nadkłykiu bocznym (*epicondylus lateralis*) kości ramiennej i są przymocowane do człona palca pośrodkowego oraz do człona palca dalszego. W pozycji stojącej utworzone jest napięcie w obu zginaczach, mimo że staw pęcಿನowy jest wyprostowany.

Staw nadgarstkowy unosi ciężar zwierzęcia z mniejszym użyciem wysiłku w porównaniu do innych stawów kończyn. Dzieje się tak, ponieważ kość promieniowa i kości stawu nadgarstkowego ułożone są w pionowej linii, więc staw unika bezpośredniego ucisku, który wpływa na jego skątowanie. Staw ten jest również stabilizowany przez połączenie pasma ścięgnowego mięśnia dwugłowego oraz promieniowego prostownika nadgarstka. Napięcie utworzone w miejscu przyczepu ścięgna – guzowatość śródreżca III kości śródreżca (*tuberositas ossis metacarpalis III*), pozwala na wyeliminowanie ruchu zginania stawu nadgarstkowego.

## Układ ustaleniowy kończyny miednicznej powyżej stawu stępu

Układ ustaleniowy kończyn miednicznych jest słabszy niż kończyn piersiowych, ponieważ większy udział biorą w nim mięśnie. Odpoczywający koń, przestępując z nogi na nogę, zwalnia pracę mięśni zmęczonych kończyny. Układ ten utworzony jest z dwóch kluczowych struktur: obustronnego systemu pasm ścięgnistych stawu stępu i kolanowego oraz mechanizmu blokowania rzepki.

System pasm ścięgnistych łączy staw kolanowy i staw stępu, nie dopuszczając do zginania lub prostowania tych stawów niezależnie od siebie. System ten jest stworzony przez antagonistyczne działanie mięśnia strzałkowego trzeciego i mięśnia powierzchniowego zginacza palca. Mięsień strzałkowy trzeci prostownik stawu kolanowego ma swój przyczep bliższy na bocznym kłykiu kości udowej i biegnie w kierunku doczaszkowym kości piszczelowej, przechodząc przez staw kolanowy i staw stępu, mając przyczep dalszy na bliższym końcu III kości śródstopia. Mięsień ten jest utworzony głównie z tkanki ścięgnistej.

Podczas zginania stawu kolanowego, ze względu na połączenie z III kością śródstopia, staw stępu jest również zginany. Podczas ruchu prostowania stawu kolanowego następuje automatyczny wyprost stawu stępu. Dzieje się tak ze względu na ułożenie mięśnia zginacza powierzchniowego palca pomiędzy dołem nadkłykiowym kości udowej (*fossa supracondylaris*) a guzem piętowym (*tuber calcanei*), mającym swój przyczep dalszy na członie palca bliższego i pośrodkowego. Mięsień ten zbudowany jest z większej ilości tkanki ścięgnistej w porównaniu do mięśnia kończyny piersiowej, co umożliwia gromadzenie większych zapasów energii.

Ruch prostowania wspomagany jest przez izometryczne skurcze mięśnia brzuchatego, który ma przyczep na wysokości guza piętowego. Ruch prostowania mięśnia jest ograniczony ruchem kości udowej, ponieważ mięsień brzuchaty pochodzi z dalszego końca doogonowej powierzchni kości udowej, nie może więc wykonać ruchu prostowania bez inicjowania ruchu prostowania stawu kolanowego [4, 10].

Obustronny system pasm ścięgnistych oznacza jednoczesne zamknięcie stawu kolanowego i stawu stępu. Zamykanie stawu kolanowego jest spowodowane interakcją pomiędzy rzepką i jej

więzadłami (więzadło pośrodkowe, przyśrodkowe, boczne) a przyśrodkowym bloczkiem kości udowej (*trochlea ossis femoris*).

Ruch wyprostowania stawu kolanowego przez mięsień czworoboczny uda pozwala na ruch unoszenia i rotacji (około 15°) rzepki, umożliwiając przemieszczenie się rzepki przez przyśrodkowy grzebień bloczka (*crista pateralis lateralis*). Umożliwia to więzadłu przyśrodkowej rzepki przesunięcie się w kierunku dolygonowym, na przyśrodkowy bloczek i blokowanie rzepki [4].

Uruchomienie stawu kolanowego jest związane z ponownym ruchem wyprostowania stawu kolanowego przez mięsień czworogłowy uda, podczas gdy mięsień dwugłowy uda „ciągnie” bocznie rzepkę, umożliwiając zsuniecie się jej na grzebień. Utrzymywanie blokady odbywa się przy użyciu minimalnego wysiłku mięśni.

#### **Układ ustaleniowy kończyny poniżej stawu nadgarstkowego i stawu stępu**

Układ ustaleniowy poniżej stawu nadgarstkowego kończyny piersiowej i stawu stępu kończyny miednicznej utworzony jest z podobnych struktur. Staw pęciny znajduje się w pozycji nadwyprostowanej, gdzie palec wysunięty jest do przodu w stosunku do długiej osi kończyny, natomiast kąt (około 150°) stawu pęciny skierowany jest ku tyłowi. W stabilizacji stawu pęciny udział bierze mięsień międzykostny pośrodkowy, który znajduje się na dłoniowej powierzchni III kości śródreżca/III kości śródstopia. Na wysokości trzeszczek członu palca bliższego mięsień rozdziela się na dwie części, łącząc się grzbietowo z prostownikiem palca i przeciwdziałając załamaniu osi palca trójczłonowego.

Ścięgno mięśnia zginacza powierzchniowego palców bierze również udział w podparciu stawu pęciny. Jest ono przymocowane do kości promieniowej przez dodatkowe więzadło mięśnia zginacza powierzchniowego palców jedynie w kończynie piersiowej, ponieważ brak jest dodatkowego więzadła w kończynie miednicznej.

Ścięgno mięśnia zginacza głębokiego palców pełni funkcję wsparcia dla stawu pęciny i stawu koronowego. Jest ono złączone przez więzadło dodatkowe mięśnia zginacza głębokiego palca, idącego od III kości śródreżca w kończynie piersiowej i od III kości śródstopia w kończynie miednicznej [3, 10].

Zaletą tego mechanizmu jest oszczędność energetyczna mięśni, która opóźnia proces ich zmęczenia.

#### **Czynniki fizjologiczne przyczyniające się do ukształtowania mechanizmu ustaleniowego**

Fizyczne zmęczenie mięśnia oznacza przejściowe zmniejszenie sprawności ruchowej organizmu do wykonywania wysiłku. Zmęczenie stanowi również mechanizm zabezpieczający organizm przed nadmiernym wysiłkiem i tym samym przed nadmiernym zaburzeniem homeostazy ustroju. Jedną z głównych przyczyn zmęczenia mięśnia jest ubytek źródła energii [9], spowodowany deficytem tlenowym oraz brakiem węglowodanów (glukozy) do produkcji ATP. Może to spowodować niezdolność mięśni do pracy [5, 6].

W zmęczonym mięśniu zmniejsza się amplituda skurczów i wydłuża się faza rozkurczu, rozkurcz staje się niepełny i rozwija się przykurcz. Zmniejsza się pobudliwość mięśnia do pracy. Reakcje te są spowodowane kumulacją różnych metabolicznych produktów, powstałych podczas oddychania beztlenowego. Podczas wysokiej intensywności ruchu, gdy naczynia krwionośne nie dostarczają mięśniom dostatecznej ilości tlenu lub powstawanie kwasu pirogronowego przewyższa tempo jego

rozkładu (utleniania), kwas pirogronowy podlega przemianie w kwas mlekowy. Następnie kwas mlekowy dyfunduje z komórek mięśniowych do krwi, powodując zakwaszenie środowiska komórek. Jest to z kolei przyczyną osłabienia zdolności skurczu mięśnia. Kwas mlekowy jest związkami toksycznym i to on odpowiada za ból, który pojawia się po intensywnym wysiłku. Proces fizjologicznego zmęczenia mięśnia jest podobny u wszystkich ssaków. Nie mógł on zatem być jedynym czynnikiem, który zdecydował o powstaniu układu ustaleniowego u koni.

Mięśnie szkieletowe są odpowiedzialne za kontrolowanie postawy i mechaniki ruchu szkieletu. Mięśnie te można podzielić na dwie klasy, w zależności od występowania typu włókien – włókna wolnokurczące się typu I i włókna szybko kurczące się typu II. Włókna typu I charakteryzują się powolnym narastaniem siły skurczu i dużą wytrzymałością na zmęczenie. Włókna te są bardziej odporne na zmęczenie, bo zawierają wiele mitochondriów i duże stężenie mioglobiny, co jest istotne, gdyż energię do skurczu czerpią z procesów tlenowych, z niskim wykorzystaniem ATP [8]. Natomiast włókna kurczliwe typu II charakteryzują się zdolnością do aktywnego kurczenia się, ale są mniej wytrzymałe, ponieważ zawierają mniejsze stężenie mioglobiny niż włókna typu I. Energję do skurczu czerpią z procesów glikolizy. Fizjologia i budowa mięśnia jest podobna u wszystkich ssaków, nie mogła zatem się przyczynić do powstania układu ustaleniowego tylko u koni

#### **Czynniki środowiskowe przyczyniające się do ukształtowania mechanizmu ustaleniowego**

Klimatyczne zmiany środowiskowe miały znaczący wpływ na globalne rozmieszczenie i przeżycie różnych gatunków zwierząt. Spadek temperatur w epoce eocenu spowodował redukcję stref tropikalnych i umiarkowanych, a wzrost suchego i jałowego podłoża. Nacisk środowiskowy wywołał zmiany w budowie zwierząt kopytnych. Zwiększenie wytrzymałości tych zwierząt było istotne ze względu na konieczność przemierzania dużych odległości w poszukiwaniu pokarmu i wody [1]. Zmiany klimatu i w konsekwencji środowiska naturalnego odzwierciedliły się w zmianach fizjologicznych i anatomicznych koniowatych.

*Hyracotherium* – najwcześniejszy przodek koni żyjący w okresie epoki eocenu, był niewielkim zwierzęciem dobrze przystosowanym do życia w środowisku leśnym. Jego ruchliwość była widoczna w zwiększonej zdolności ruchu kończyn. Zapewniała to budowa anatomiczna stawu łokciowego oraz ułożenie główki kości udowej. Rozwój ewolucyjny skrzydła kości biodrowej, zwiększający jego rotację oraz rozwój krętarza większego, powodował wzrost siły mięśnia pośladkowego pośrodkowego. *Hyracotherium* był czteropalczasty na przednich kończynach i trzypalczasty na tylnych [7].

Żyjący w epoce późnego eocenu *Meshippus* był podobny w budowie ciała do *Hyracotherium*. Postęp ewolucyjny dotyczył zmian trzech palców, ze znacznym rozwinięciem centralnej kości śródreżca. U obu wymienionych przodków konia mięsień międzykostny pośrodkowy (*ligamentum suspensorium*) i zginacze kończyn były utworzone z mięśni, zamiast ze struktur więzadłowych, jak jest u obecnego konia. Ówczesni przodkowie konia charakteryzowali się niską masą i niewielkim rozmiarem ciała, co gwarantowało minimalne zużycie energii.

Dalsze zmiany klimatyczne w epoce późnego oligocenu i wczesnego miocenu wiązały się ze zwiększeniem obszarów stepowych i zmniejszaniem powierzchni lasów. Nastąpił wówczas podział gatunków przodków konia na poszukujące (*Hippa-*

tion) i trawożerne (*Merychippus*). Zwierzęta te były trójpalczaste, ale drugi i czwarty palec istniały już tylko w postaci krótkich wyrostków. Nastąpił także znaczny wzrost rozmiaru ich ciała (ok. 100 cm wysokości w kłębie), co musiało wpłynąć na zmiany lokomocyjne układu ruchu. Boczny ruch kończyn został ograniczony, centralny palec wydłużył się, a opuszek palców został zastąpiony przez kopyto, zmieniając trójpalczastość na jedнопalczastość. Również mięsień międzykostny pośrodkowy zaczął się wydłużać. Rozwój trzszczek zapewnił ochronę oraz zwiększył wydajność pracy ścięgien i więzadeł. Rozwój centralnego palca miał znaczenie przy unoszeniu zwiększonej masy ciała zwierząt, natomiast boczne palce miały za zadanie wspomagać poruszanie się i stabilizację [7].

W następnej epoce pliocenu, u przedstawicieli przodków konia *Pliohippus*, *Dinohippus* i *Equus* struktury aparatu ruchu kończyn były poddawane dalszej ewolucji. Nastąpił rozwój centralnego palca oraz guzka pośredniego – doczaszkowej części główki, bliższej powierzchni stawowej kości ramiennej. Guzek pośredni jest strukturą, którą mięsień dwugłowy ramienia zamyka w mechanizmie obecnego układu ustaleniowego w kończynie piersiowej. Ewolucja struktury guzka zainicjowała rozwój układu ustaleniowego [7].

Wszystkie te adaptacje miały na celu utworzenie efektywnego, mocnego wykroku w odpowiedzi na zwiększającą się ilość wolnej przestrzeni w okresie późnego miocenu i na początku pliocenu. Oznaczało to, że konie i inne pasące się kopytne ssaki stały się bardziej widoczne dla drapieżcy. Rozwój szybkości i wytrzymałości tych zwierząt był częściowo spowodowany zagrożeniem ze strony drapieżców.

Następujące stopniowo zmiany klimatu wpłynęły na zróżnicowanie nisz ekologicznych, powodując podział gatunku koniowatych na poszukujące i trawożerne. Zmiany klimatu miały również wpływ na zredukowanie powierzchni lasów i formacje sawanny trawiastej, w konsekwencji zwiększając ilość i różnorodność nisz ekologicznych.

Koń ma zdolność do przeżycia na pożywieniu gorszej jakości niż pozostałe kopytne o podobnej wielkości, np. bydło. Różnorodność spożywanego pokarmu pozwoliła koniowatym wykorzystywać niszę ekologiczną i stać się zwierzętami pasącymi, unikając konkurencji z innymi kopytnymi ssakami. W konse-

kwencji wyboru gorszej jakości pasz (pod względem energii) koniowate musiały zwiększyć masę ciała, aby móc pobierać większą ilość pokarmu, a tym samym większą ilość energii, i zminimalizować straty energii poprzez utratę ciepła [2].

W odpowiedzi na zwiększoną masę ciała i zwiększony mechanizm obciążenia struktur anatomicznych układ ustaleniowy może być uznany za mechanizm kompensacyjny zwierząt, które ewoluowały w warunkach rozwoju nowych nisz ekologicznych. Głównym powodem powstania układu wydaje się być wpływ czynników środowiskowych. Zewnętrzne czynniki środowiskowe, które miały wpływ na kierunek ewolucji kopytnych to m.in.: obecność drapieżców, zmiany klimatu, twardość podłoża oraz rodzaj pokarmu. Gatunki bydła, np. bawół czy bizon, ze względu na duże rozmiary ciała, posiadanie rogów i większą agresję wobec drapieżców w porównaniu do konia, nie potrzebowały dodatkowych mechanizmów obronnych.

## Wnioski

Nie ma jednoznacznej odpowiedzi na pytanie: dlaczego konie w czasie ewolucji wykształciły układ ustaleniowy. Prawdopodobnie warunkiem powstania tego mechanizmu jest połączenie wszystkich czynników środowiskowych, fizjologicznych i anatomicznych, które wystąpiły podczas trwania ewolucji. Ewolucja gatunku koniowatych, wynikająca ze zmian żywieniowych i połączona z presją ze strony drapieżców, jako wynik zmian środowiskowych wymagała wytworzenia mechanizmu, który pozwoliłby na zminimalizowanie zużycia energii, jak ma to miejsce w układzie ustaleniowym.

**Literatura:** 1. Berger J., 1986 – Wild horses of the Great Basin. The University of Chicago Press. 2. Budiansky S., 1997 – The Nature of Horses. Weidenfeld & Nicolson, London. 3. Budras K., Sack, W., Rock, S. 1994 – Anatomy of the Horse: An Illustrated Text. Mosby-Wolfe, London. 4. Dyce K., Sack W., Wensing C., 2002 – Textbook of Veterinary Anatomy. 3 Ed. Saunders, London. 5. Howlett R.A., Hogan M.C., 2007 – Exp. Physiol. 92 (5), 887-894. 6. Lacombe V., Hinchliff K., Georg R., Baskin C., 2001 – J. Appl. Physiol. 91 (4), 1782-1790. 7. McFadden B., 1992 – Fossil horses: systematics, paleobiology, and evolution of the family Equidae. Cambridge University Press. 8. Randall D., Burggren W., French K., 2002 – Eckert Animal Physiology. 5 Ed. W.H. Freeman & Co. New York. 9. Sahlin K., Tonkonogi M., Söderlund K., 1998 – Acta Physiologica Scandinavica 162 (3), 261-266. 10. Smythe R., Goody P., Gray P., 1993 – Horse Structure and Movement. 3 Ed. J.A. Allen & Co. Ltd., UK.

## Oryginalne rasy królików

Dorota Kowalska<sup>1</sup>, Andrzej Gugolek<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Zootechniki – Państwowy Institut Badawczy w Balicach k. Krakowa

<sup>2</sup>Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie

Obecnie w świecie znanych jest około 100 ras królików różniących się budową, wielkością, barwą i strukturą okrywy włosowej. Oprócz powszechnie znanych „belgów”, „nowozelandów” czy mieszańców, istnieje cała gama króliczych ras mało znanych przeciętnemu hodowcy. Niektóre z nich prawdopodobnie wyginą, gdyż hodowla ich jest nieopłacalna lub bywa dla hodowców zbyt dużym wyzwaniem, ze względu na trudności związane z uzyskaniem potomstwa o barwie zbliżonej do ideału. U wielu ras krzyżowanie dwóch pięknie ubarwionych osob-

ników nie zawsze gwarantuje uzyskanie potomstwa o pożądanej barwie. Dlatego też hodowla takich królików może niejednokrotnie rozczarować amatorów danej rasy, ale i tym większa może być radość hodowcy jeżeli uzyska potomstwo o oczekiwanej barwie, zgodnej ze wzorcem.

Dlatego też warto przedstawić kilka ras królików i ich odmian barwnych, których liczba w naszym kraju z roku na rok maleje – być może uda się je ocalić.

Rasą odróżniającą się od innych ras hodowlanych i dzikich przodków smukłą budową ciała jest zajęczak (fot. 1), nazywany też królikiem zajęczatym. Wzorzec hodowlany określa, że króliki te mają budowę przypominającą zajacę szaraka, jednak – wbrew opinii wielu osób – nie mają nic wspólnego z zającem. Ich wygląd jest wynikiem wieloletniej selekcji i pracy hodowlanej. Przodkowie dzisiejszego zajęczaka mają najprawdopodobniej swe korzenie w Belgii i Holandii. Na króliki o bardzo podobnej sylwetce natrafiono w czasach masowego eksportu królików z tych krajów do Anglii. Pierwsze zajęczaki pokazano w 1874