



Grawitacja rzeźbiarz świata ożywionego

*Agata Kołodziejczyk
Instytut Nauk o Środowisku UJ*

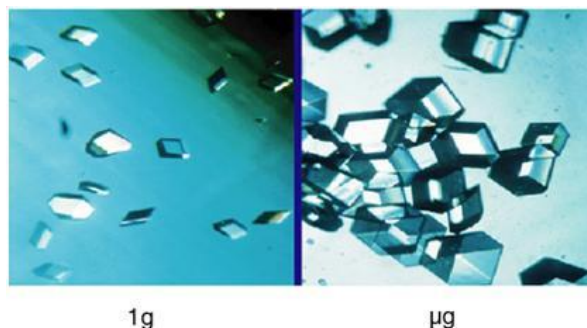
Pole grawitacyjne Ziemi odegrało kluczową rolę w powstaniu i rozwoju życia. To podstawowe oddziaływanie fizyczne stało się determinantą kształtów, wielkości i proporcji układów biologicznych. Adaptacje świata żywego do warunków ziemskiego pola grawitacyjnego przejawiają się między innymi reakcjami grawitropowymi roślin, czyli determinowaniem kierunku wzrostu rośliny przez zwrot i kierunek wektora grawitacji. U zwierząt poczucie siły ciężkości odbywa się w wyniku aktywności receptorów pozwalających im zapewnić prawidłową orientację w polu grawitacyjnym. Z receptorami tymi silnie powiązane są mechanizmy antygravitacyjne, na przykład serce pozwalające przepompowywać krew zalegającą w dolnych częściach organizmu, tętnice kontrolujące właściwe parametry ciśnienia czy układy/mechanizmy balansujące reakcje z układu kostno-szkieletowego.

Siła przyciągania ziemskiego zmieniała się lokalnie wraz z wiekiem naszej planety, i tak jest do dziś. Najlepsze dane dotyczące nieregularności grawitacyjnej naszego globu dostarczył niskoorbitowy (250 km) satelita GOCE [1], należący do ESA (2009). W miejscach łańcuchów górskich siła przyciągania jest większa niż nad morzami, najlżejsi jesteśmy natomiast w południowych Indiach i na Sri Lance. Ponadto na ciężar każdego ciała na Ziemi ma również wpływ grawitacja przyciągania Księżyca, czego widocznym efektem są np. pływy morskie. Ze względu na zwiększające się możliwości i potrzeby przebywania istot żywych w przestrzeni kosmicznej, biologia grawitacyjna i medycyna grawitacyjna są obecnie jednymi z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin nauki. Z prac poświęconych badaniom funkcjonowania organizmów żywych w warunkach mikrogravitacji wynika, że efekty grawitacyjne ujawniają się na wszystkich poziomach organizacji istoty żywej: molekularnym, komórkowym i organizmalnym.

W jaki sposób organizmy czują grawitację?

Za wyjątkiem bakterii, które pozostają grawitacyjnie obojętne i mogą normalnie rozwijać się nawet przy wartościach tzw. hipergravitacyjnych rzędu 400 G, aktywność biologiczna organizmów żywych kontrolowana jest przez receptory reagujące na wektor ciężenia. Podstawowym elementem budowy takiego receptora są kryształki utworzone z węglanu lub fosforanu wapnia zwane otolitami lub statolitami. Statolity roślin to ziarna skrobi w wyspecjalizowanych amyloplastach zwanych statocytami. Pod wpływem grawitacji ziarna skrobi opadają

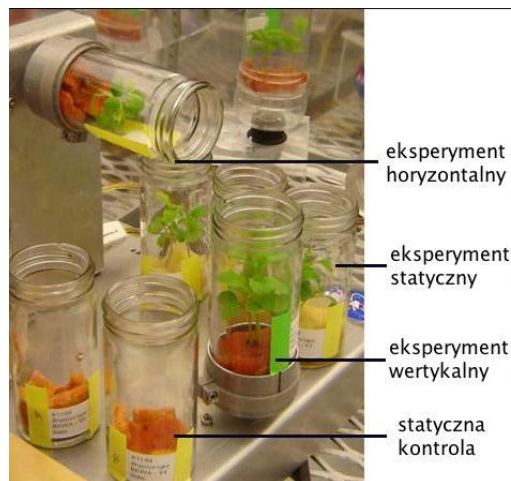
na siateczkę retikulum endoplazmatycznego (dla przypomnienia: retikulum endoplazmatyczne to wewnątrzkomórkowy system błonowy syntetyzujący białka i tłuszcze pełniący również funkcje transportowe). W odpowiedzi na grawitropowe sygnały z retikulum, roślinne hormony wzrostu zwane auksynami indukują odpowiednio zorientowany wzrost korzenia (grawitropizm pozytywny) i łodygi (grawitropizm negatywny). Mechanizm działania otolitów zwierzęcych wymaga obecności pokrytej włoskami komórki receptorowej. Otolity opadając na włoski czuciowe komórek receptorowych generują informację rejestrującą kierunek oddziaływania siły ciężkości a tym samym informację o położeniu organizmu w przestrzeni. Otolity ludzkie mają kształt pryzmatów wielkości 1–10 μm i znajdują się w kanałach półkolistych błędnika błoniastego będącego jednocześnie narządem słuchu i równowagi we wnętrzu czaszki. Ostatnie badania [2] wykazały, że reakcja na siłę ciężkości nie jest przypisana wyłącznie wyspecjalizowanym systemom percepcyjnym. Okazuje się, że nawet tak proste struktury biologiczne jak błony komórkowe reagują na grawitację poprzez zmiany w przepuszczalności dwuwarstwy lipidowej. W konsekwencji zmianie ulega potencjał błonowy i stężenie jonów wapniowych we wnętrzu komórek. Wchodząc głębiej w poziomy ultrastrukturalne należy zaznaczyć, że środowisko mikrograwitacyjne silnie wpływa na przemiany związków chemicznych. Zjawisko to coraz częściej wykorzystuje się do tworzenia nowych materiałów, które w warunkach ziemskich nigdy by nie powstały. W szczególności dotyczy to tworzenia kryształów, które w mikrograwitacji rosną większe i pozbawione strukturalnych defektów, jakie tworzone są w trakcie krystalizacji na Ziemi (rys. 1) (dla zainteresowanych polecam stronę www.microgravity.com z obszerną wiedzą na ten temat). Tak powstające materiały gwarantują lepszą jakość, trwałość produktów i wydajniejsze przemiany chemiczne. Krystalizacja insuliny w warunkach nieważkości precyzyjniej określa naturę tego białka, co w następstwie prowadzi do głębszego zrozumienia procesów leczenia cukrzycy. Komórki hodowane na płytkach polimerowych w warunkach mikrograwitacyjnych nie są spłaszczone, jak te hodowane na Ziemi, a tym samym bardziej przypominają komórki występujące naturalnie w organizmie, co zwiększa powodzenie zabiegów transplantacyjnych. Interesującym przykładem badań nad efektami mikrograwitacji jest również analiza płonącego płomienia świecy w nieważkości, która pozwala na opracowanie wydajniejszych metod spalania i oszczędzania energii. Nasuwają się pytania, czy również złożone biochemicznie organizmy żywe przekształciłyby się w formy doskonalsze i wydajniejsze energetycznie w środowisku pozbawionym grawitacji? Jak zmieniałyby się ich kształty i proporcje? Jak zmieniałyby się kinetyka procesów biochemicznych? Generalnie problem ujmując, **czy życie bez grawitacji byłoby możliwe?**



Rys. 1. Różnice w procesie krystalizacji ludzkiego białka insuliny w warunkach ziemskich (po lewej) i w mikrograwitacji. Źródło: www.microgravity.com

Symulacje mikrograwitacji w warunkach ziemskich

Ze względu na złożoność układów biologicznych, postawione problemy naukowe nie są łatwe do badania. Pomimo szeregu trudności ludzie od dawna interesowali się tym tematem. Koncept urządzenia symulującego brak grawitacji został zaproponowany już w 1703 roku przez Denisa Dodarta. W 1879 Julius von Sachs skonstruował pierwszy **klinostat** (rys. 2), który był zegarowo nakręcaną maszyną zastąpioną później odpowiednikami o napędzie elektrycznym.



Rys. 2. Przykład możliwego do wykonania eksperymentu z wykorzystaniem klinostatu. W ciągu 5 tygodni rośliny z gatunku kapustnych (*Brassica rapa*) hodowano na specjalnym medium BIONA w warunkach symulowanej mikrograwitacji (eksperyment horyzontalny). Aby wyeliminować wpływ obrotu dysku na rozwój rośliny, równoległe hodowano rośliny w warunkach grawitacyjnych na dysku (eksperyment wertykalny) i w eksperymencie statycznym. Dodatkowo badano właściwości samego medium (statyczna kontrola). Wyniki tego eksperymentu znajdują się w interaktywnej bazie danych (IPOD – *Interactive Plant Outreach Database*), która jest udostępniona naukowcom, nauczycielom i ogólnej publiczności. Źródło: NASA (<http://weboflife.nasa.gov/slstp/rn.htm>)

Pierwszy klinostat elektryczny powstał w 1897 roku. Klinostat jest urządzeniem wykorzystującym ruch obrotowy do niwelowania siły grawitacyjnej w trakcie wzrostu i rozwoju rośliny (niwelowania grawitropizmu). Na osi poziomej klinostatu umieszczony jest dysk obrotowy.

Roślina przymocowana jest do dysku tak, aby jej oś pokrywała się z osią poziomą. W wyniku obrotu rośliny wokół osi poziomej wartość przyspieszenia ziemskiego jest uśredniana na 360 stopniach, a wynik tego uśrednienia jest zbliżony do warunków mikrograwitacyjnych. Klinostaty są używane nie tylko do symulowania warunków mikrograwitacji, ale również niwelowania efektów wpływu światła słonecznego. Co ciekawe, za pomocą klinostatu można modyfikować wartość siły ciężenia, na przykład symulować grawitację księżycową (około 1/6 g). Wystarczy umieścić dysk z rośliną pod kątem około 10 stopni. Roślina reaguje na siłę ciężenia jedynie w przypadku, kiedy siła ta oddziałuje dłużej niż krytyczna wartość czasu, zwana minimalnym czasem prezentacji (MPT – *Minimal Presentation Time*). Dla różnych gatunków roślin wartość ta zmienia się w zakresie od 10 do 200 sekund. W przypadku zwierząt czas prezentacji MPT jest jeden lub dwa rzędy wielkości krótszy niż u roślin, przez co niemożliwe jest przeprowadzanie podobnych eksperymentów na całych zwierzętach. Optymalizacja tempa rotacji klinostatu jest kluczowym elementem przeprowadzanych eksperymentów. Jeśli prędkość kątowna jest zbyt mała, roślina generuje fizjologiczne odpowiedzi na siłę grawitacji. Gdy obrót dysku jest zbyt szybki, siły odśrodkowe i napięcia mechaniczne wywołują powstawanie niepożądanych artefaktów, a nawet śmierć organizmu. Optymalizacja działania klinostatu odbywa się aktualnie przez porównanie odpowiedzi na mikrograwitację obserwowanych u roślin hodowanych na stacji kosmicznej, gdzie wartości ciężenia utrzymują się na poziomie 0,0001–0,0005 G. Dla większości roślin dostosowano w ten sposób zakresy od 0,3 do 3 obr/min. Klinostaty szybkoobrotowe (30–150 obr/min) wykorzystuje się do analizy małych próbek zwierzęcych (kultury komórkowe w naczynkach o kilkumilimetrowej średnicy) umieszczonych na płynnych mediach. Tylko w tak przygotowanych próbkach można uniknąć efektów przeciążeń.

Klinostaty jednoosiowe umożliwiają symulację mikrograwitacji tylko wokół jednej osi obrotu. Skonstruowano także klinostaty trój- lub dwuosiowe (zwane w skrócie RPM – *Random Positionin Machines*) Hosona, umożliwiające uśrednianie wektora grawitacji we wszystkich możliwych kierunkach. Klinostaty takie zbudowane są z ruchomych ramek wirujących niezależnie jedna w drugiej. Badania wykorzystujące właściwości tego urządzenia dotyczyły między innymi analizy wczesnych stadiów rozwoju embrionalnego w warunkach symulowanej nieważkości [3]. Japończycy przeprowadzili eksperymenty zapłodnienia *in vitro* (łac. w szkle) wykorzystując mysie komórki rozrodcze. Okazało się, że mikrograwitacja wywiera minimalne efekty na zapłodnienie. Jednakowoż brak oddziaływania grawitacyjnego może być szkodliwy dla dalszego rozwoju zarodka.

Embriony hodowane w mikrograwitacji osiągają stadium dwukomórkowe i pozostają żywe aż do implementacji w ciele samicy, jednak ze znacznie niższym prawdopodobieństwem niż w przypadku odpowiedników hodowanych z przeciążeniem 1 G. W miarę upływu czasu inkubacji w klinostacie obserwowano zwiększoną śmiertelność zarodków, a tempo rozwoju zarodków spadło po 96 godzinach eksperymentu. Analiza mikroskopowa takich zarodków wykazała, że różnicowanie się komórek embrionalnych w tkankę odżywiająca embrion i ostatecznie tworząca łożysko było znacznie zahamowane. Przeprowadzone eksperymenty rzuciły w wątpliwość nadzieje przetrwania gatunku ludzkiego w nieważkości, jednak należy zdać sobie sprawę, że wyniki tego typu badań powinny być interpretowane ostrożnie. Symulacja mikrograwitacji w klinostatach nie jest rozwiązaniem idealnym. Pomimo obrotu dysku albo ramek tego urządzenia, siła ciężenia wciąż oddziałuje z badanymi próbkami biologicznymi, z tą różnicą, że jest pozbawiona kierunkowości. Powinno się mówić zatem nie tyle o symulacji mikrograwitacji, lecz o stymulacji grawitacyjnej we wszystkich kierunkach. Kolejna sprawa: wibracje z silnika i inne efekty motoryki układu mogą wywołać niekontrolowane artefakty.

Alternatywą klinostatu do symulowania nieważkości jest urządzenie generujące ciągły spadek swobodny zwane FFM – *free fall machine*, wynalezione przez Meslanda, które umożliwia przeprowadzanie eksperymentów na małych próbkach (np. zawieszinach komórkowych). Takie próbki poddawane są spadkowi swobodnemu w polu grawitacji na długości jednego metra w czasie trwającym niewiele mniej niż sekunda. Następnie są one wypychane z powrotem na szczyt aparatury przez zastosowanie impulsu ogromnej siły (ok. 20 G w czasie 20 ms), po czym ponownie opadają. Zasada działania tej maszyny polega na tym, że przez większość czasu próbka pozostaje w stanie swobodnego spadku (0 G), a okresy przeciążenia są zbyt krótkie, aby mogły być rejestrowane przez fizjologiczne procesy w badanym materiale biologicznym. Pytanie, czy stan ciągłego spadku swobodnego z szarpnięciami 20 G jest środowiskiem idealnym dla procesów biochemicznych...

Ekspertymenty na stacji kosmicznej

Pomimo dużych wysiłków z dostosowaniem odpowiednich narzędzi umożliwiających badania mikrograwitacyjne na Ziemi, wciąż najlepszym miejscem na ich wykonywanie jest przestrzeń kosmiczna. Podróże kosmiczne, zwłaszcza w ostatnich latach, przyczyniły się do głębszego zrozumienia wpływu oddziaływania siły ciężenia na organizmy żywe. Obiektami badań w eksperymentach były bakterie, grzyby, glony, pierwotniaki, rośliny, komórki ssaków (np. ludzka komórka nerkowa, ludzkie erytrocyty, limfocyty, fibroblasty i osteoblasty) oraz całe organizmy żywe [5]. Badania nad bakteriami dowiodły, że w przypadku mikrograwitacji obserwowane jest zwiększenie liczebności i tempa wzrostu kolonii w porównaniu z grupą kontrolną oraz wzrost odporności na wysokie

dawki promieniowania kosmicznego i, co ciekawe, również na antybiotyki. Eksperymenty przeprowadzone nad grzybem *Physarum polycephalum* pokazały, że w warunkach mikrogravitacji jego cytoplazma zaczyna pulsować, czego nie obserwuje się na Ziemi. U glonów brak siły ciężenia przyczynia się do zmniejszenia objętości chloroplastów, a u pierwotniaka *Paramecium tertarelia* komórki wykazywały zwiększone tempo podziałów i około 20-procentowe zwiększenie szybkości przyrostu objętości. Komórki układu odpornościowego zwane limfocytami w warunkach mikrogravitacji wykazały 90-procentowy spadek aktywności [4]. Uważa się, że powyższy efekt prowadzi do obniżenia odporności immunologicznej kosmonautów. Kolejnym ciekawym zjawiskiem jest ruchliwość plemników w mikrogravitacji [6]. Badania na spermie jeźwców (sperma tego gatunku jest bardziej jednorodna niż w przypadku innych zwierząt, a plemniki są bardziej żywotne), wykazały interesujące różnice w zachowaniu tych komórek. Okazuje się, że ruchliwość plemników jest znacząco większa w stanie nieważkości. Pomimo tego wydajność zapłodnienia maleje ze względu na obniżenie aktywności kluczowego enzymu w procesie uwalniania materiału genetycznego (białka fosfatazy).

Najbardziej fascynującymi badaniami są być może eksperymenty z udziałem samych astronautów, którzy przebywają długoterminowo na stacjach kosmicznych. Eksperymenty te dostarczają cennych danych z zakresu **medycyny grawitacyjnej**. Wynikiem przebywania w warunkach mikrogravitacji jest nie tylko powszechnie znany ubytek masy mięśni i kości, ale również płuc, serca, wątroby, nerek, żołądka oraz jelit. Mięśnie szkieletowe wykształcone w celu utrzymania pionowej pozycji ciała i poruszania poszczególnymi jego częściami, przeciwdziałające sile grawitacji, w nieważkości stają się bezużyteczne i ulegają zanikowi (tzw. atrofii). Przemianom ulega nie tylko ilość, ale i struktura tkanki mięśniowej: powoli kurczące się włókna mięśniowe (tzw. mięśnie gładkie), przeciwstawiające się ciągłym obciążeniom występującym w warunkach ziemskich, zamieniane są na szybko kurczące się włókna mięśniowe, służące do natychmiastowej reakcji [7]. Zanikowi podlega również zbędna w nieważkości, a kosztowna energetycznie dla organizmu, zbroja tkanki kostnej. Utrata kości, zwłaszcza w końcowych odcinkach kości długich, jest wynikiem zahamowania różnicowania komórek prekursorowych (tzw. osteoblastów) w komórki kostne, podczas gdy liczba osteoblastów pozostaje stała. Ostatnie badania wykazały, jak można przeciwdziałać tym procesom. Dwie godziny ćwiczeń fizycznych dziennie wraz z zastosowaniem diety bogatej w wapń i witaminę D mogą znacznie spowolnić proces zaniku kości nie tylko astronautów, ale i cierpiących na osteoporozę.

Istotny wpływ na funkcjonowanie organizmu ludzkiego ma rozkład płynów ustrojowych. W warunkach mikrogravitacji owe płyny wznoszą się do górnych części ciała, wywołując zmniejszenie o około 10% objętości nóg. Dopływ krwi do górnych partii, czyli do klatki piersiowej i głowy, powoduje obrzmienie twa-

rzy (tzw. twarz księżycowa: *moon face*), trudności w oddychaniu oraz przekrwienie błon śluzowych zatok i nosa. Ze względu na chroniczny katar astronauta mają ograniczone czucie smaku i zapachu. Przemieszczenie się płynów jest również przyczyną zmian w gospodarce wodno-elektrolitowej. Przykładem jest zmiana szybkości filtracji nerek oraz 20-procentowe zmniejszenie objętości naczyń krwionośnych prowadzące do nadmiaru erytrocytów. W celu zrównoważenia tych procesów zmniejszona zostaje synteza czerwonych krwinek.

Złożonym zagadnieniem badawczym jest funkcjonowanie układu nerwowego człowieka w kosmosie. Narządy zmysłów i narządy przedsionkowe, znajdujące się w uchu wewnętrznym, mięśnie i stawy, a także receptory dotyku i nacisku biorące udział w percepcji grawitacji przestają być użyteczne. Zmienione warunki grawitacyjne powodują zmianę parametrów sygnałów odbieranych przez te narządy, np. narząd przedsionkowy przestaje rozróżniać kierunek góra-dół. Receptory dotyku i nacisku przestają sygnalizować zwrot przyciągania w dół. Powoduje to szereg złudzeń orientacyjnych, jak np. uczucie odwróconej pozycji, brak odczuwania ruchu pojazdu kosmicznego. Wszystko to przyczynia się do wywołania mdłości, zawrotów głowy i złego samopoczucia nawet do trzech dni po zmianie środowiska grawitacyjnego. Odkrycie mechanizmu adaptacji zmysłów równowagi do zmian grawitacyjnych może pomóc astronautom łagodniej przechodzić przez stany nieważkości i normalnej grawitacji. Badania te mogą również stanowić ważny krok do poznania przyczyn choroby lokomocyjnej oraz w szerszym zakresie wpłynąć na poznanie mechanizmów uczenia się i zapamiętywania.

Badania efektów mikrogravitacji na organizmy żywe wymagają użycia niejednokrotnie skomplikowanej aparatury, na co nie zawsze pozwalają warunki na stacji kosmicznej. Dodatkowo badania te wymagają odpowiednich eksperymentów kontrolnych. Zwykło się je wykonywać na Ziemi i porównywać z eksperymentami przeprowadzanymi w laboratoriach Międzynarodowej Stacji Kosmicznej ISS (International Space Station). Okazuje się jednak, że należy również wziąć pod uwagę inne **czynniki, których nie można zapewnić na Ziemi**. Są to między innymi promieniowanie kosmiczne, wibracje i obecność innych gazów w otoczeniu. Problem badania efektów grawitacyjnych na organizmy żywe jest więc wciąż otwartym wyzwaniem dla wszystkich zainteresowanych. NASA oferuje współpracę, otwiera konkursy i tym samym daje możliwość udziału w biologicznych eksperymentach prowadzonych na stacji ISS. Mamy szansę osobiście uczestniczyć w zgłębianiu natury życia, aby czynić je doskonałym, umożliwiającym opuszczenie kolebki Ziemi i wyruszenie na podbój innych światów.

Bibliografia

- [1] www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/The_Living_Planet_Programme/Earth_Explorers/GOCE Earth's gravity revealed in unprecedented detail.
- [2] Kohn F. 2013. *High throughput fluorescent screening of membrane potential and intracellular calcium concentration under variable gravity conditions*. *Microgravity Science and Technology*, 25: 113–120.
- [3] Wakayama S., Kawahara Y., Li C., Yamagata K., Yuge L., Wakayama T. 2009. *Detrimental effects of microgravity on mouse preimplantation development in vitro*. *PLoS One*, 4(8): e6753.
- [4] Schwarzenberg M., Pippia P., Meloni M.A., Cossu G., Cogoli-Greuter M., Cogoli A. 1999. *Signal transduction in T-lymphocytes – a comparison of the data from space, the free fall machine and the random positioning machine*. *Advanced Space Research* 24(6): 793–800.
- [5] Jasik-Ślęzak J., Ślęzak A. 2008. *O biofizycznej roli środowiska grawitacyjnego*. *Zdr. Publ.* 118(1): 65–71.
- [6] Tash J.S., Bracho G.E. 1999. *Microgravity alters protein phosphorylation changes during initiation of sea urchin sperm motility*. *The FASEB Journal* 13(9001): 543–554.
- [7] Monici M., Cialdai F., Romano G. et al. 2013. *Effect of IR laser on myoblasts: prospects of application for countering microgravity – induced muscle atrophy*. *Microgravity Science and Technology* 25(1): 35–42.



„Czas leci” podczas Konkursu „Eksperyment łańcuchowy”