

Magnetorecepcja i wyrównanie magnetyczne u ssaków niemigrujących

Aleksandra Kujalowicz
Uniwersytet Gdański, Wydział Biologii
E-mail: aleksandra.kujalowicz@wp.pl

Słowa kluczowe: magnetorecepcja, wyrównanie magnetyczne, myskowanie lisów, orientacja, ssaki niemigrujące

Streszczenie: Badania behawioralne doprowadziły do odkrycia umiejętności postrzegania pola magnetycznego Ziemi u różnorodnych taksonów zwierząt, od płazińców i owadów po kręgowce. Wiele gatunków wykorzystuje magnetorecepcję, aby nawigować się w czasie dalekich migracji. Zauważono jednak, że również zwierzęta, które nie migrują, reagują na pole magnetyczne lub jego zmiany. Wykazują one silne preferencje do konkretnego kierunku ustawienia ciała względem wyczuwanego pola magnetycznego, czyli wyrównanie magnetyczne. Takie zachowanie może ułatwiać funkcjonowanie w stadzie, wpływać na miejsce budowy gniazda, wspierać orientację w terenie, a nawet zwiększać skuteczność polowania. Zjawisko to wymaga głębszego poznania.

Wstęp

Na skutek działania prądów konwekcyjnych w jądrze Ziemi, wewnątrz i wokół kuli ziemskiej występuje pole magnetyczne, z biegunami w pobliżu biegunów geograficznych. Chroni ono powierzchnię Ziemi przed szkodliwym wpływem wiatru słonecznego (Lanza i Meloni, 2006). Obserwacje zachowań zwierząt i eksperymenty z migrującymi ptakami dorowadziły do odkrycia, że niektóre zwierzęta potrafią wykorzystywać pole magnetyczne do orientacji w przestrzeni i nawigacji (Wiltschko, 1968). Dotychczas zdolność korzystania z magnetyzmu Ziemi została potwierdzona u różnych grup zwierząt, w tym przedstawiciele wszystkich gromad kręgowców, niektórych stawonogów, a nawet mięczaków (Wiltschko i Wiltschko, 2006).

Opisano dwa podstawowe mechanizmy, za pomocą których zwierzęta mogą wyczuwać siły magnetyczne. Jeden z nich, tzw. model par rodników, zakłada wykorzystanie kryptochromu – fopigmentu, który po wzbudzeniu przez foton tworzy pary rodnikowe elektronów. Od układu linii pola magnetycznego w otoczeniu zależy, czy elektrony przyjmą

stan singletowy, czy tripletowy, co wykrywane jest przez odpowiedni receptor. Biologiczny kompas wykorzystujący ten mechanizm pozwala wskazać, po której stronie znajduje się równik, a po której biegun magnetyczny, nie wskazuje jednak różnicy pomiędzy biegunem północnym i południowym (Wiltschko i Wiltschko, 2022).

Drugi mechanizm wykorzystuje magnetyt, rodzaj tlenku żelaza o trwałych właściwościach magnetycznych. Magnetyt może być produkowany przez organizmy żywe i gro-madzony w różnych organach. Jego połączenie z kanałami jonowymi umożliwia magnetycznie modulowane pobudzanie neuronów i, w efekcie, magnetorecepcję. Mechanizm oparty na magnetycie pozwala na rozróżnianie biegunów i jest niezależny od światła. Istnieją dowody na jego obecność u niektórych nietoperzy, a także u kreto-szczurów *Fukomys anelli* (Caspar i in., 2020; Wiltschko i Wiltschko, 2022). Śladowe ilości magnetytu zostały również wykryte w ludzkim mózgu (Kirschvink, 1992).

Zwierzęta używają magnetorecepcji, aby nawigować się podczas swoich dalekich migracji (wieloryby, bizona, karibu, gnu i in.) i aby odnajdować drogę do "domu" (psy, koty, konie) (Begall i in., 2014). w tych przypadkach korzyści i biologiczne znaczenie zdolności wyczuwania pola magnetycznego wydają się oczywiste. Okazuje się jednak, że niektóre gatunki wykorzystują pole magnetyczne w innych celach. w ciągu ostatnich kilku dekad liczne grupy badawcze obserwowały u zwierząt zjawisko nazywane wyrównaniem magnetycznym (*magnetic alignment*, MA). Polega ono na spontanicznym ustawianiu (pozycjonowaniu) przez organizmy osi swojego ciała w sposób nie przypadkowy, lecz wzdłuż osi północ-południe (Begall i in., 2013). Takie zachowanie jest trudne do badania, ponieważ może być tłumione lub masko-

wane przez ustawianie się zwierząt w stronę pożywienia, wody, innych osobników i innych czynników. Dodatkowo, biologiczne znaczenie tej zdolności jest dość enigmatyczne i wciąż oparte przede wszystkim na hipotezach i domysłach.

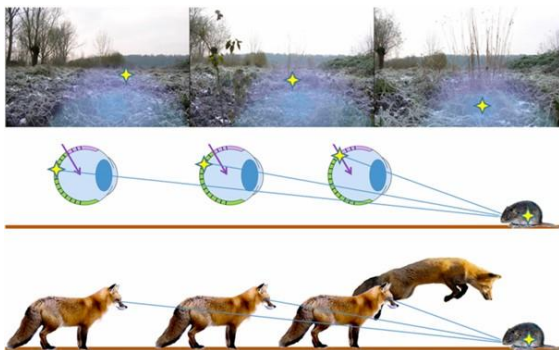
Wykorzystanie magnetorecepcji może zwiększyć skuteczność polowania

Lis rudy (*Vulpes vulpes*) wykazuje unikalną, wspieraną przez magnetorecepcję, strategię polowania, po angielsku nazywaną mousing, „myszkowanie”. Podczas łowów na drobne zwierzęta, takie jak gryzonie, namierza swoją ofiarę podchodząc do niej powoli, niemal bezszelestnie, uważnie obserwując i nasłuchując. Gdy zlokalizuje już swój cel, raptownie wyskakuje i atakuje gryzonia od góry (Červený i in., 2011; Painter i in., 2016). Co ciekawe, lisy są w stanie precyzyjnie pochwycić ofiarę, nawet gdy kryje się ona w wysokiej trawie lub kilka stóp pod powierzchnią śniegu i nie można w pełni polegać na percepcji wzrokowej.

Z badań wynika, że lisy wykorzystują pole magnetyczne i wyrównanie magnetyczne, aby wspomóc słuchową lokalizację ofiary i zwiększyć sukces łowów (Červený i in., 2011). Lisy przymierzające się do skoku na ofiarę zazwyczaj ustawiają się w kierunku północno-wschodnim. Co więcej, skoki w osi północny wschód – południowy zachód są trzy do czterech razy skuteczniejsze niż skoki w innych kierunkach. Kierunek ataku jest kluczowym czynnikiem decydującym o sukcesie, zwłaszcza w przypadku polowania na ofiarę skrytą w wysokiej trawie lub głębokim śniegu. w niskiej trawie, gdzie ofiarę można łatwiej zobaczyć, ukierunkowanie odgrywa mniej znaczącą rolę (Červený i in., 2011).

Proponowany mechanizm tego zjawiska przedstawia model „magnetycznego dalmierza” (ang. *magnetic range finder*) (Phillips i in., 2010). Według tej teorii, lisy potrafią

oszacować odległość od ofiary używając inklinacji pola geomagnetycznego (inklinacją nazywamy kąt pomiędzy wektorem natężenia pola magnetycznego w danym miejscu Ziemi a horyzontem). Prawdopodobnie wykorzystują mechanizm fotopigmentów i postrzegają pole magnetyczne jako pewien rodzaj wizualnego wzoru lub siatki na siatkówce oka (Begall i in., 2013; Malkemper i Peichl, 2018). w trakcie polowania lisy przesuwają się w stronę widzianego lub słyszanego gryzonia wzdłuż osi północ-południe do momentu, gdy wzór na siatkówce nałoży się na przewidywaną lokalizację ofiary. w ten sposób wyznaczony zostaje określony dystans i lis skacze pod szablonowym, wyuczonym kątem, precyzyjnie lądując przy ofierze (Červený i in., 2011). Mechanizm ten obrazuje rycina 1.



Ryc.1. Hipotetyczna zasada wykorzystania mechanizmu „magnetycznego dalmierza” podczas polowania lisa (źródło: Červený i in., 2011; Begall i in. 2013)

Myszkowanie lisów jest jedynym znanym behawiorem wykorzystującym pole geomagnetyczne do mierzenia dystansu, a nie pozycji lub lokalizacji. Nie ulega wątpliwości, że ustawienie w kierunku północno-wschodnim podczas skoku znacząco zwiększa skuteczność łowów (Červený, 2011). Magnetorecepcja dała lisom przewagę w zdobywaniu pokarmu. Dlaczego inne gatunki nie zyskały tej umiejętności w toku ewolucji – pozostaje zagadką.

Wyrównanie magnetyczne porządkuje zachowanie w stadzie

Zupełnie inny przejaw wyrównania magnetycznego można zaobserwować u przeżuwaczy, takich jak bydło domowe (*Bos taurus taurus*), jelenie szlachetne (*Cervus elaphus*), czy sarny europejskie (*Capreolus capreolus*). Sabine Begall ze współpracownikami (2008) przeanalizowała obrazy satelitarne z programu Google Earth. Badanie wykazało, że zwierzęta te mają tendencję do ustawiania swojego ciała wzdłuż osi północ-południe. Usytuowanie takie było obecne zarówno podczas wypasania, jak i podczas spoczynku, kiedy na orientację ciała nie wpływają inne czynniki. Co więcej, ustawienie zwierząt było bardziej przypadkowe w pobliżu linii wysokiego napięcia, które wytwarzają pole magnetyczne o skrajnie niskiej częstotliwości (ang. *extremely low frequency magnetic field*, ELFMF) i zakłócają pole geomagnetyczne (Burda i in., 2009). Ten fakt może sugerować zdolność krów i saren do magnetorecepcji.

Również u stad owiec wykazano spontaniczne ustawianie się w osi północny wschód – południowy zachód (Rodríguez i de Miguel Águeda, 2018). Podobnie, tendencję do pozycjonowania ciała w osi północ-południe zaobserwowano u guńca zwyczajnego (*Phacochoerus africanus*) oraz dzika euroazjatyckiego (*Sus scrofa*). Co ciekawe, dziki stojące w parach prezentowały antyrównoległe ustawienie. Może być to strategia służąca ochronie przed drapieżnikami (Červený i in., 2017). Wyniki obserwacji obydwu wspomnianych zespołów badawczych wskazują, że ustawienie zwierząt nie zależy od warunków pogodowych, wiatru, nasłonecznienia, pory dnia czy roku. Czynnikiem, który zdaje się mieć decydujący wpływ na spontaniczne ustawianie się zwierząt, jest układ linii pola magnetycznego.

U przeżuwaczy i innych zwierząt żyjących w stadach i grupach rodzinnych, wyrównanie magnetyczne może służyć utrzymywaniu kursu pasienia i zgrzania roślinności. Może również pomóc w synchronizowaniu przemieszczania się osobników w obrębie stada oraz w wybraniu wspólnego kierunku biegu, co jest szczególnie istotne w sytuacji ucieczki przed drapieżnikami. Istnieją także sugestie, że magnetorecepcja w tym przypadku jest pozostałością ewolucyjną po przodkach, którzy odbywali migracje na duże odległości (Begall, 2013).

Pole magnetyczne jest wykorzystywane przy określaniu miejsca budowy gniazda

Jednym z lepiej zbadanych przypadków jest zdolność magnetorecepcji u gryzoni, zwłaszcza tych prowadzących podziemny tryb życia. Przykładowo, kretoszczury z gatunku *Fukomys anelli* wykazują preferencję do budowania gniazd po południowej lub południowo-wschodniej części dostępnej areny. Eksperymentalna zmiana magnetycznej północy za pomocą cewki Helmholtza prowadzi do odpowiedniej zmiany miejsca zakładania gniazda (Burda i in., 1990). Dalsze badanie na gryzoniach doprowadziły do odkrycia, że preferencja określonego kierunku magnetycznego przy budowie gniazda występuje również u innych gatunków, takich jak kretoszczur *Spalax ehrenbergi*, chomik syberyjski (*Phodopus sungorus*), mysz leśna (*Apodemus sylvaticus*) czy nornica ruda (*Clethrionomys glareolus*) (Wiltschko i Wiltschko, 2022).

Nie tylko gryzonie wykazują tendencję do kierowania się magnetyzmem Ziemi podczas budowy gniazda. Podobne zachowanie zauważono u nietoperzy z gatunku mroczek brunatny (*Eptesicus fuscus*) i karlik większy (*Pipistrellus nathusii*). w ich przypadku, tak jak u żyjących pod ziemią kretoszczurów, za

wyczuwanie pola magnetycznego odpowiada niezależny od światła mechanizm wykorzystujący kryształki magnetytu obecne w głowie zwierzęcia. Eksperymentalne zastosowanie krótkiego, silnego pulsu magnetycznego, może zmienić namagnetyzowanie cząstek magnetytu i wywołać trwałe lub czasowe zmiany w preferowanej orientacji budowy gniazda (Wiltschko i Wiltschko, 2022).

Dla zwierząt budujących podziemne tunele zdolność wyrównanie do linii pola magnetycznego jest przydatna w utrzymywaniu kierunku kopania i w orientowaniu się pod ziemią (Begall, 2014). Podobnie, wszelkie zwierzęta żyjące na otwartych polach i w innych środowiskach bez wyraźnych punktów orientacyjnych, mogą wykorzystywać wyrównanie magnetyczne, aby orientować się w przestrzeni (Hart i in., 2013). Lokalizowanie gniazda po wybranej stronie dostępnego terenu może ułatwiać powrót po eksploracji środowiska lub odnalezienie własnego gniazda wewnątrz kolonii. Wykorzystanie zmysłu magnetycznego niezależnego od światła zdaje się mieć szczególne znaczenie u zwierząt żyjących pod ziemią lub prowadzących nocny tryb życia (Wiltschko i Wiltschko, 2022).

Wyrównanie magnetyczne może służyć orientowaniu wewnętrznej mapy terenu

Ciekawym przypadkiem jest ustawianie osi ciała zgodnie z kierunkiem linii pola magnetycznego tylko na krótkie chwile, podczas swobodnego poruszania się. Wykazano, że psy domowe spuszczone ze smyczy, poruszające się po otwartym terenie przejawiają tendencję do ustawiania swojego ciała wzdłuż osi północ-południe podczas znakowania terenu (oddawania moczu) oraz defekacji. Ta zasada sprawdzała się jedynie w wypadku spokojnych warunków magnetycznych. Nasuwa się wniosek, że psy są zdolne

do wyczuwania małych zmian wskaźnika deklinacji magnetycznej (Hart i in., 2013). Zgodnie z wynikiem eksperymentu przeprowadzonego przez Yosefa i jego uczniów, umieszczenie w ziemi magnesów wystarczy, aby istotnie zmienić kierunek ustawiania się psa (Yosef i in., 2020).

Przyczyna lub zastosowanie takiego zachowania są nieznane. Badacze sugerują, że psy wykorzystują wyrównanie magnetyczne podczas oznaczania terenu, aby wyśrodkować lub skalibrować swoją wewnętrzną mapę, w odniesieniu do punktów orientacyjnych w środowisku i z wykorzystaniem magnetyzmu jako punktu odniesienia. Prawdopodobnie wykorzystują MA w sposób zbliżony do tego, jak wędrowcy wykorzystują kompas podczas swoich wypraw – aby skalibrować mapę i porównać informacje pozyskane przez inne zmysły (np. wizualne, węchowe) ze stałym odniesieniem (pole magnetyczne) (Hart i in., 2013). Zastosowanie wyrównania magnetycznego wydaje się być istotnym przystosowaniem do poruszania się w jednorodnie wyglądającym środowisku, wykorzystywanym przez liczne gatunki zwierząt posługujących się magnetorecepcją, w tym mysz leśną (Malkemper, 2015) i dzika euroazjatyckiego (Červený i in., 2017). Ponadto, magnetyczny system referencyjny może być użyteczny podczas eksploracji terenu, do integracji wielozmysłowych informacji o otoczeniu i przebytej drodze, i tworzenia wewnętrznej, spójnej mapy poznanej przestrzeni (Malkemper i in., 2015).

Podsumowanie

Wyrównanie magnetyczne, zjawisko spontanicznego ustawiania swojego ciała zgodnie z wybranym kierunkiem geomagnetycznym, nadal jest tajemniczym zagadnieniem, zwłaszcza u ssaków. Zachowanie takie było obserwowane w wielu różnych sytuacjach, od polowania i znakowania terenu, po spo-

czynek i budowanie gniazd. Znaczenie zdolności wyczuwania pola magnetycznego powinno zostać lepiej zbadane. Ta wiedza jest ważna nie tylko dla lepszego zrozumienia zachowania zwierząt, ale też aby ograniczyć zakłócenia w naturze powodowane przez ludzką działalność. Zgodnie ze słowami Sabine Begall, "ekologia każdego zwierzęcia jest odzwierciedlona w zestawie zmysłów, w jakie zostało wyposażone. Dlatego też każda analiza wpływu dużych inwestycji budowlanych (drogi, tory, linie wysokiego napięcia) na środowisko naturalne, powinna w przyszłości brać pod uwagę magnetorecepcję, zanim podjęta zostanie ostateczna decyzja".

Literatura:

- Begall, S., Červený, J., Neef, J., Vojtěch, O., & Burda, H., 2008. Magnetic alignment in grazing and resting cattle and deer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(36), 13451-13455.
- Begall, S., Malkemper, E. P., Červený, J., Němec, P., & Burda, H., 2013. Magnetic alignment in mammals and other animals. *Mammalian Biology*, 78, 10-20.
- Begall, S., Burda, H., & Malkemper, E. P., 2014. Magnetoreception in mammals. *Advances in the Study of Behavior*, 46, 45-88.
- Burda, H., Marhold, S., Westenberger, T., Wiltshchko, R., & Wiltshchko, W., 1990. Magnetic compass orientation in the subterranean rodent *Cryptomys hottentotus* (Bathyergidae). *Experientia*, 46, 528-530.
- Burda, H., Begall, S., Červený, J., Neef, J., & Němec, P., 2009. Extremely low-frequency electromagnetic fields disrupt magnetic alignment of ruminants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(14), 5708-5713.
- Caspar, K. R., Moldenhauer, K., Moritz, R. E., Němec, P., Malkemper, E. P., & Begall,

- S., 2020. Eyes are essential for magneto-reception in a mammal. *Journal of the Royal Society Interface*, 17(170).
- Červený, J., Begall, S., Koubek, P., Nováková, P., & Burda, H., 2011. Directional preference may enhance hunting accuracy in foraging foxes. *Biology Letters*, 7(3), 355-357.
- Červený, J., Burda, H., Ježek, M., Kušta, T., Husinec, V., Nováková, P., ... & Malkemper, E. P., 2017. Magnetic alignment in warthogs *Phacochoerus africanus* and wild boars *Sus scrofa*. *Mammal Review*, 47(1), 1-5.
- Deutschlander, M. E., Freake, M. J., Borland, S. C., Phillips, J. B., Madden, R. C., Anderson, L. E., & Wilson, B. W., 2003. Learned magnetic compass orientation by the Siberian hamster, *Phodopus sungorus*. *Animal Behaviour*, 65(4), 779-786.
- Hart, V., Nováková, P., Malkemper, E. P., Begall, S., Hanzal, V., Ježek, M., ... & Burda, H., 2013. Dogs are sensitive to small variations of the Earth's magnetic field. *Frontiers in Zoology*, 10(1), 1-12.
- Kirschvink, J. L., Kobayashi-Kirschvink, A., Woodford, B. J., 1992. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(16), 7683-7687.
- Lanza, R., Meloni, A., 2006. The Earth's Magnetic Field. *Springer Berlin Heidelberg*, 1-66.
- Malkemper, E. P., Eder, S. H., Begall, S., Phillips, J. B., Winklhofer, M., Hart, V., & Burda, H., 2015. Magnetoreception in the wood mouse (*Apodemus sylvaticus*): influence of weak frequency-modulated radio frequency fields. *Scientific reports*, 5(1), 9917.
- Malkemper, E. P., & Peichl, L., 2018. Retinal photoreceptor and ganglion cell types and topographies in the red fox (*Vulpes vulpes*) and Arctic fox (*Vulpes lagopus*). *Journal of Comparative Neurology*, 526(13), 2078-2098.
- Painter, M. S., Blanco, J. A., Malkemper, E. P., Anderson, C., Sweeney, D. C., Hewgley, C. W., ... & Phillips, J. B., 2016. Use of bi-loggers to characterize red fox behavior with implications for studies of magnetic alignment responses in free-roaming animals. *Animal Biotelemetry*, 4(1), 1-19.
- Phillips, J. B., Muheim, R., & Jorge, P. E., 2010. a behavioral perspective on the biophysics of the light-dependent magnetic compass: a link between directional and spatial perception?. *Journal of Experimental Biology*, 213(19), 3247-3255.
- Rodríguez, M. G., & de Miguel Águeda, F. J., 2018. Body orientation of sheep in herds. *Small ruminant research*, 166, 83-86.
- Wiltschko, W., 1968. Über den Einfluß statischer Magnetfelder auf die Zugorientierung der Rotkehlchen (*Erithacus rubecula*). *Zeitschrift für Tierpsychologie*, 25(5), 537-558.
- Wiltschko, R., & Wiltschko, W., 2006. Magnetoreception. *Bioessays*, 28(2), 157-168. Wiltschko, W., & Wiltschko, R., 2022. Magnetoreception in mammals and birds: a comparison (Mammalia, Aves). *Lynx, series nova*, 53(1).
- Yosef, R., Raz, M., Ben-Baruch, N., Shmueli, L., Kosicki, J. Z., Fratzczak, M., & Tryjanowski, P., 2020. Directional preferences of dogs' changes in the presence of a bar magnet: Educational experiments in Israel. *Journal of veterinary behavior*, 35, 34-37.
- Notka o autorce: *Studentka drugiego roku studiów magisterskich na kierunku Biologia, specjalizacja biologia molekularna i komórkowa. Podczas studiów licencyjnych przez trzy semestry uczestniczyła w programie tutoring na Wydziale Biologii UG. Na co dzień w laboratorium zajmuje się badaniem bakterii, jest jednak zafascynowana całym światem przyrody. Lisy to jej ulubione zwierzęta.*