

ANDRZEJ M. ŻÓŁTOWSKI

Metoda badania naturalnej nawigacji u ptaków

Zarys treści. Przedstawiono i uzasadniono nową koncepcję projektowania i interpretacji eksperymentów z powrotną nawigacją ptaków (homing). Podstawą koncepcji jest zakładanie z góry hipotetycznych układów współrzędnych służących do naturalnej nawigacji, a następnie doświadczalne sprawdzanie ich prawdziwości. Sformułowano zasady przeprowadzania eksperymentów. Podano przykład projektu eksperymentu.

1. Wprowadzenie

Wiele doświadczeń wykazało, że ptaki wykorzystują dla orientacji i nawigacji różne zjawiska zachodzące w naturze. Identyfikacja tych zjawisk nie jest łatwa, ponieważ w trakcie eksperymentów wiele z nich zachodzi jednocześnie. Niemniej jednak badania zachowania się ptaków w naturalnych warunkach i w laboratoriach pozwoliły stwierdzić hierarchię, czyli kolejność wykorzystania niektórych wskazówek nawigacyjnych w wypadku ich jednoczesnego występowania. Na ten temat WALCOTT [13] pisze:

„Istnieje powszechna zgoda, że gołębie posługują się kompasem słonecznym, gdy tylko mogą to robić; ... lecz w warunkach zachmurzenia okazuje się, że przechodzą one na kompas magnetyczny. Gołębie mają dwa systemy kompasowe, jeden używany przy słonecznej pogodzie, drugi podczas zachmurzenia”.

Doświadczenia z powrotną nawigacją ptaków wykazały, że gołębie poddawane działaniu zmiennych i stałych pól magnetycznych w czasie transportu [2], [7] wybierały inny kierunek odlotu (vanishing bearing), niż ptaki z grupy kontrolnej. Kierunek odlotu może też być uzależniony od wielkości anomalii magnetycznych w miejscu uwolnienia [12], zakłóceń zmian dobowych pola magnetycznego [6], warunków topograficznych lub meteorologicznych [3], odczuć węchowych [9], a także wieku i doświadczenia ptaka.

Wydaje się, że tak znaczny zasób wiedzy uzasadnia śmielsze niż dotychczas stawianie celu badań eksperymentalnych. Celem tym byłaby identyfikacja istniejących na powierzchni Ziemi układów współrzędnych wykorzystywanych przez ptaki do nawigacji, czyli „map” w sensie użytym przez KRAMER'a [8].

Realizacja takiego zadania wymagałaby przestrzegania pewnych zasad wynikających z dotychczasowego dorobku naukowego i jego różnych interpretacji, nieraz sprzecznych ze sobą [5], [15]. Pierwsza, ogólna zasada wynikająca wprost z postawionego celu, może być sformułowana następująco:

wszelkie eksperymenty i obserwacje zachowania się ptaków, służące (I) określeniu nawigacyjnego układu współrzędnych, powinny być dokonywane w warunkach naturalnych.

Można przewidywać, że najwłaściwszym sposobem poszukiwań takiego układu współrzędnych są eksperymenty z powrotną nawigacją ptaków, ponieważ ptak uwolniony w nieznanym mu miejscu musi określić swoje położenie względem celu (gniazda, gołębnika) i wybrać właściwy kierunek lotu, czyli wykonać w efekcie komplet czynności nawigacyjnych. Przy planowaniu i interpretacji wyników eksperymentów powinno być przyjęte założenie, że określony ptak w danym miejscu i momencie posługuje się tylko jednym konkretnym układem współrzędnych, lub nawet częścią tego układu w postaci jednej tylko współrzędnej. Należy oczywiście brać przy tym pod uwagę, że fizyczny sens współrzędnych, a więc i sam układ może się zmieniać w zależności od warunków meteorologicznych, topograficznych, sposobu transportu, pory dnia, odległości od celu, wieku ptaka i z pewnością wielu innych okoliczności. Powyższe rozumowanie może posłużyć do sformułowania drugiej zasady ułatwiającej, a niekiedy wręcz umożliwiającej właściwą interpretację rezultatów doświadczeń:

podczas obserwacji ptaka po uwolnieniu, liczba wskazówek nawigacyjnych jednocześnie dostępnych ptakowi powinna być w miarę możliwości ograniczona i niezmienna.

Praktyczna realizacja tej zasady jest uwzględniona w przykładzie projektowanego eksperymentu.

2. Hipotezy i ich znaczenie

WALLRAFF (według [1]), w swojej „hipotezie zerowych osi” zaproponował i zastosował konkretny sposób wyznaczania nawigacyjnego układu współrzędnych. Uwalniał mianowicie gołębie w wielu punktach rejonu otaczającego gołębnik i na podstawie zaobserwowanych kierunków odlatywania określił skośny, prostoliniowy układ współrzędnych X, Y oznaczając przez X_0 i Y_0 osie (izolinie) przechodzące przez gołębnik (cel) i przyjmując gradienty X i Y prostopadłe do tych osi. Układ ten „pasował” do rezultatów otrzymanych na prawie wszystkich punktach ekspe-

rymetru, tzn. ptaki jak gdyby ustalały swoją pozycję względem celu na podstawie przyrostów $X - X_0$ i $Y - Y_0$, a kierunki odlotu na podstawie kierunków gradientów X i Y . Z góry założona geometryczna regularność poszukiwanego układu współrzędnych i gradientów utrudnia jednak jego fizyczną interpretację, czyli skojarzenie z rozkładem konkretnych zjawisk fizycznych zachodzących na powierzchni Ziemi. Z drugiej strony rezygnacja z warunków geometrycznych wymagałaby znacznego zwiększenia liczby punktów doświadczalnych (punktów uwalniania). Takie postępowanie byłoby więc dość trudne do realizacji.

Wydaje się, że jest obecnie możliwa inna droga postępowania. Należałoby najpierw założyć hipotetyczny układ współrzędnych w postaci układu izolinii przedstawiających rozkład dwóch konkretnych zjawisk fizycznych i ich gradientów, a następnie sprawdzać ekperymentalnie czy ptaki rzeczywiście „posługują się” tym układem. Warunki geometryczne wymagane od takiego układu mogą być znacznie słabsze niż u WALLRAFF’a, a mianowicie:

- izolinie X_0 i Y_0 przechodzące przez cel oraz izolinie $X = \text{const.}$ i $Y = \text{const.}$ nie muszą być liniami prostymi,
- kierunki gradientów X i Y obserwowane przez ptaki nie muszą być identyczne z kierunkami rzeczywistych (maksymalnych) gradientów X i Y w danym punkcie.

Takie przybliżone gradienty, których kierunki mogą być w danym punkcie określane niezależnie od przebiegu odpowiednich izolinii będą nazywane gradientami zastępczymi.

W efekcie tych modyfikacji powstaje możliwość wykorzystania map izolinii różnych zjawisk fizycznych obserwowanych na powierzchni Ziemi do konstrukcji układów współrzędnych i określania gradientów zastępczych [17]. Rejony, w których izolinie tworzą krzywe zamknięte lub silnie pofalowane, gradienty są znacznie większe niż przeciętne lub kierunki gradientów zastępczych znacznie odbiegają od kierunków gradientów rzeczywistych, nazywane są rejonami anomalnymi. Zakładając konkretny układ współrzędnych w postaci izolinii przedstawiających rozkład dwóch zjawisk fizycznych należy brać pod uwagę, aby izolinie tworzące układ i kierunki obu gradientów zastępczych przecinały się pod dostatecznie dużymi kątami.

Program doświadczeń powinien określać miejsce uwalniania ptaków na podstawie analizy rozkładu izolinii hipotetycznego układu. Oznaczając w dalszym ciągu hipotetyczne współrzędne przez X i Y , najprostszą realizację tej myśli jest lokalizacja miejsc uwalniania na izoliniach X_0 i Y_0 . Uzyskuje się w ten sposób możliwość prostej interpretacji wyników na podstawie logicznego domniemania, że ptak uwolniony na przykład na izolinii X_0 powinien kierować się rzeczywistym bądź zastępczym gradientem współrzędnej Y . Taka lokalizacja pozostaje też w zgodzie z zasadą (II), ponieważ eliminuje potrzebę wykorzystywania gradientu X , czyli

zmniejsza liczbę jednocześnie działających wskazówek nawigacyjnych. Jak widać, celem tak prowadzonych badań jest wykazanie prawdziwości przyjmowanych hipotez lub ich elementów. W miarę uzyskiwania rezultatów badań można dobierać inne specyficzne miejsca lub rejony eksperymentów aż do prób stwierdzenia, w jaki sposób ptak wykorzystuje jednoczesną obserwację pary gradientów (*grad X* i *grad Y*). Istnieją oczywiście i inne możliwości wykorzystania hipotetycznych układów do projektowania doświadczeń. RANVAUD i in. [10] uwalniał na przykład gołębie na izol linii $Y=0$, czyli na równiku magnetycznym, ponieważ w tym wypadku współrzędna Y oznacza inklinację magnetyczną.

Wszystko, co zostało dotychczas powiedziane w tym rozdziale można podsumować w postaci trzeciej zasady:

terenowe eksperymenty z powrotną nawigacją ptaków powinny być (III) programowane na podstawie uprzednio sporządzonych map izol linii i gradientów, przedstawiających rozkład zjawisk fizycznych stanowiących hipotetyczne wskazówki nawigacyjne.

System nawigacyjny umożliwiający ptakowi wybór kierunku lotu docelowego na podstawie rejestrowania różnych otaczających zjawisk fizycznych, może w określonych warunkach ulegać dryftowi bądź dekalibracji. Jest to hipotetyczna interpretacja wyników wielu eksperymentów, m.in. wymienionych we wstępie, zaś najlepszym przykładem i potwierdzeniem takiej interpretacji jest możliwość sztucznej regulacji zegara biologicznego żywych organizmów. Zmianę stanu systemu nawigacyjnego można rozumieć jako przesunięcie izol linii X_0 i Y_0 na hipotetycznej „mapie” ptaka, czyli inaczej mówiąc zmianę wartości X i Y przypisywanych izol liniom X_0 i Y_0 . Ponieważ powoduje to w odczuciu ptaka zmianę położenia celu, niezmiernie ważną staje się znajomość stanu systemu nawigacyjnego ptaka w chwili poddawania go eksperymentowi. Wydaje się, że jedyną drogą osiągnięcia tego jest zachowanie podczas eksperymentu — szczególnie w czasie transportu — stanu „pierwotnego”, w naturalny sposób ukształtowanego w rejonie gniazda czy gołębnika. Dotyczy to przede wszystkim zachowania cyklu światło-ciemność (zegar biologiczny) i przynajmniej niektórych elementów pola magnetycznego Ziemi. W ten sposób można uzasadnić czwartą zasadę:

ptaki poddawane eksperymentom powinny być chronione przed zmianami zjawisk fizycznych stanowiących podstawę hipotetycznego systemu nawigacyjnego i zabezpieczone przed innymi wpływami powodującymi niezamierzone reakcje po uwolnieniu.

Realizacja tej zasady może być niekiedy dość trudna i wymagać specjalnych pojemników do transportu, wyposażonych na przykład w regulo-

wany system oświetleniowy i magnetyczny system kompensacyjny. Stosowanie tej zasady może też oznaczać potrzebę rezygnacji z jakiegokolwiek obciążania ptaka lub też dokonywania na nim sztucznych zabiegów [4].

3. Przykład projektu eksperymentu

Jako podstawę projektu przyjęto hipotetyczny, astronomiczno-magnetyczny układ współrzędnych, na który składają się izolinie czasu wschodu słońca (T), wyrażonego w czasie uniwersalnym (GMT) oraz izolinie inklinacji magnetycznej (I) zwane izoklinami [18]. Zagadnienie inklinacji magnetycznej jako współrzędnej nawigacyjnej oraz jej gradnietu zastępczego, którym może być wektor skierowany ku północy magnetycznej w miejscu obserwacji, zostało już przedstawione w osobnej publikacji [17]. Do analizy rozkładu wartości inklinacji magnetycznej na obszarze objętym eksperymentami można na ogół korzystać z gotowych map izoklin opracowanych dla poszczególnych krajów, regionów lub całej powierzchni Ziemi. Należy jednak brać pod uwagę, że te ostatnie nie wykazują lokalnych i większości regionalnych anomalii, co w przypadku ich wykorzystania wymagałoby uzupełniających pomiarów terenowych w rejonach doświadczeń. Natomiast mapy izolinii czasu wschodu słońca trzeba do każdego eksperymentu specjalnie konstruować, ponieważ przebieg izolinii zmienia się w zależności od lokalizacji gniazda i daty eksperymentu.

Czas miejscowy wschodu środka tarczy słonecznej wyraża się przybliżonym wzorem

$$\cos(LT) = \operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi \quad (3.1)$$

gdzie δ oznacza aktualną deklinację słońca, zaś φ szerokość geograficzną miejsca obserwacji. Korzystając z elementarnej zależności $LT = T + \lambda$ otrzymamy

$$T = \arccos(\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi) - \lambda \quad (3.2)$$

Pozostaje teraz znaleźć zbiór punktów (φ , λ) na powierzchni Ziemi, na których wschód słońca następuje w tej samej chwili (T_0) co w miejscu gniazdowania. Ponieważ równanie (3.2) dla tego miejsca (φ_0 , λ_0) przybiera postać

$$T_0 = \arccos(\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi_0) - \lambda_0 \quad (3.3)$$

warunek równoczesności wschodów ($T = T_0$) pozwala z układu równań (3.2) i (3.3) wyrugować T_0 . Podstawiając jeszcze $\varphi - \varphi_0 = \Delta\varphi$ i $\lambda - \lambda_0 = \Delta\lambda$ otrzymuje się równanie

$$\Delta\lambda = \arccos(\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg}(\varphi_0 + \Delta\varphi)) - \arccos(\operatorname{tg} \delta \operatorname{tg} \varphi_0) \quad (3.4)$$

które może posłużyć do skonstruowania izolinii T_0 poczynając od punktu (φ_0 , λ_0) to znaczy miejsca gniazdowania. Inne izolinie, np. $T_0 + 1^h$, $T_0 + 2^h$,

..., $T_0 - 1^h$, $T_0 - 2^h$, ... można uzyskać przesuwając po powierzchni Ziemi izolinie T_0 co 15° w długości geograficznej odpowiednio na zachód i na wschód (rys. 1).

Już ze sposobu konstrukcji kolejnych izolinii o wzrastających wartościach T widać, że wektor *grad* T jest skierowany ku zachodniej części widnokregu. Jest to oczywiste, ponieważ im dalej na zachód, tym wschód słońca następuje później. Można zatem przyjąć, że w średnich szerokościach zastępczy gradient T jest zwrócony w kierunku przeciwnym obserwowanemu wschodowi słońca. Przybliżony azymut wschodu środka tarczy słonecznej wyraża się wzorem

$$\cos \alpha = \sin \delta / \cos \varphi \quad (3.5)$$

na podstawie którego można obliczyć i wykreślić na mapie (rys. 1) kierunek zastępczego gradientu T w dowolnym punkcie o znanej szerokości geograficznej (φ). Deklinację słońca (δ) występującą we wzorach (3.1) (3.5) oblicza się z tablic astronomicznych, gdzie jest podawana jako funkcja daty i czasu uniwersalnego lub efemerydalnego [11].

Sposób wykorzystania zjawiska wschodu słońca do określenia swojej pozycji względem izolinii T_0 i wyboru kierunku poruszania się dla jej osiągnięcia wydaje się dostatecznie prosty i naturalny, ażeby mógł być stosowany przez ptaki lub inne żywe organizmy nie obdarzone zdolnością rozumowania. Jeśli ptak został przemieszczony na zachód od izolinii T_0 , to dysponując swoim zegarem biologicznym wskazującym słoneczny czas miejscowy na południku λ_0 może stwierdzić, że wschód słońca następuje później niż w rejonie gniazda. W tej sytuacji najbardziej naturalną reakcją jest lot w kierunku wschodzącego słońca, jak gdyby „wyjście na spotkanie”, ażeby zjawisko nastąpiło we właściwej porze. Lot w tym kierunku (wschodnim) zbliża oczywiście do izolinii T_0 . Odwrotna sytuacja powstaje po przemieszczeniu na wschód. Ptak widząc, że wschód słońca następuje za wcześnie „ucieka” w kierunku przeciwnym (zachodnim), aby opóźnić występowanie zjawiska, co także prowadzi go w kierunku izolinii T_0 .

Ponieważ izokliny $I = \text{const.}$ mają przebieg ogólnie biorąc równoleżnikowy, zaś izolinie $T = \text{const.}$ w średnich szerokościach południkowy, tworzą one razem siatkę umożliwiającą — przy wykorzystaniu gradientów zastępczych — nawigację do punktu przecięcia izolinii I_0 i T_0 czyli do gniazda. Należy jednak w tym wypadku brać pod uwagę, że pierwotne przemieszczenie „równoleżnikowe” musi być odpowiednio duże, aby ptak mógł stwierdzić przyspieszenie lub też opóźnienie chwili wschodu słońca. WALLRAFF (według [1]) w swojej wspomnianej już hipotezie oznaczył przez TX_1 i TX_2 granice przedziału, w którym ptak nie jest w stanie określić kierunku przemieszczenia względem osi X_0 czyli znaku różnicy $X - X_0$. W wypadku podstawienia współrzędnej T należy się więc spodziewać, że przedział ten będzie odpowiednio duży, rzędu np. 2 godzin, co w szerokości geograficznej 52° oznaczałoby przeszło 2000 km. Gdyby eks-

perymenty potwierdziły taką ocenę, dla powrotnej nawigacji ptaków z odległości rzędu setek kilometrów trzeba poszukiwać innej wskazówki (współrzędnej) nawigacyjnej.

Opisany powyżej układ stanowiący podstawę eksperymentu wymaga założenia, że druga współrzędna tj. inklinacja magnetyczna dostarcza ptakowi znacznie dokładniejszej informacji o jego położeniu względem izokliny I_0 . W przeciwnym wypadku ptak nie miałby już do dyspozycji żadnej izoliny, która mogłaby mu wyznaczyć trasę prowadzącą do rejonu gniazda. Sposób nawigacji w takim zróżnicowanym, w sensie dokładności, układzie opisał wyczerpująco WALLRAFF [14].

W celu eksperymentalnej weryfikacji tego układu można powtórzyć (z pewnymi zmianami) doświadczenie MATTHEWS'a, który z powodzeniem badał zdolność powrotu burzyków (*Puffinus Puffinus*) z Bostonu w Stanach Zjednoczonych i z Wenecji do gniazd na zachodnim wybrzeżu Wielkiej Brytanii (według [1]). Zmiany polegałyby przede wszystkim na przesunięciu obu rejonów uwalniania tak, aby leżały odpowiednio na izoliniach I_0 i T_0 oraz na zaprojektowaniu jeszcze dwóch dodatkowych rejonów dla zbadania powrotnej nawigacji ptaków z kierunków przeciwnych. Ponieważ przebieg izoklin $I = \text{const.}$ zmienia się w cyklu wiekowym, a izoliny $T = \text{const.}$ w cyklu rocznym, projekt eksperymentu musi być opracowany na konkretną datę. Na rysunku 1 przedstawiony jest, jako przykład, projekt omawianego eksperymentu na dzień 5 maja 1975 roku. Wszystkie liczbowe dane magnetyczne i astronomiczne podane na rysunku i dalej w tekście mają charakter ilustracyjny i są przybliżone.

Dane wyjściowe:

deklinacja słońca — $\delta = 16^\circ$,

położenie gniazda — $\varphi_0 = 51^\circ, 7$; $\lambda_0 = -5^\circ, 3$ (Skokholm, W. Bryt.),

inklinacja magnetyczna w rejonie gniazda — $I_0 = 66^\circ, 7$,

czas wschodu słońca w rejonie gniazda — $T_0 = 4^h 56^m$ (GMT).

Rejony uwalniania:

- a) rejon Cape Hatteras, USA — $\varphi = 35^\circ, 3$; $\lambda = -75^\circ, 5$; $I = I_0$; $T = T_0 + 5^h 19^m$; $\alpha = 70^\circ, 3$.
- b) rejon Chełma, Polska — $\varphi = 51^\circ, 1$; $\lambda = 23^\circ, 5$; $I = I_0$; $T = T_0 - 1^h 53^m$; $\alpha = 64^\circ, 0$,
- c) rejon Vik, Islandia — $\varphi = 63^\circ, 5$; $\lambda = -19^\circ, 1$; $I = I_0 + 8^\circ, 3$; $T = T_0$; deklinacja magnetyczna $D = -20^\circ, 5$,
- d) rejon Algeru, Algeria — $\varphi = 36^\circ, 5$; $\lambda = 3^\circ, 7$; $I = I_0 - 15^\circ, 4$; $T = T_0$; deklinacja magnetyczna $D = -3^\circ, 4$.

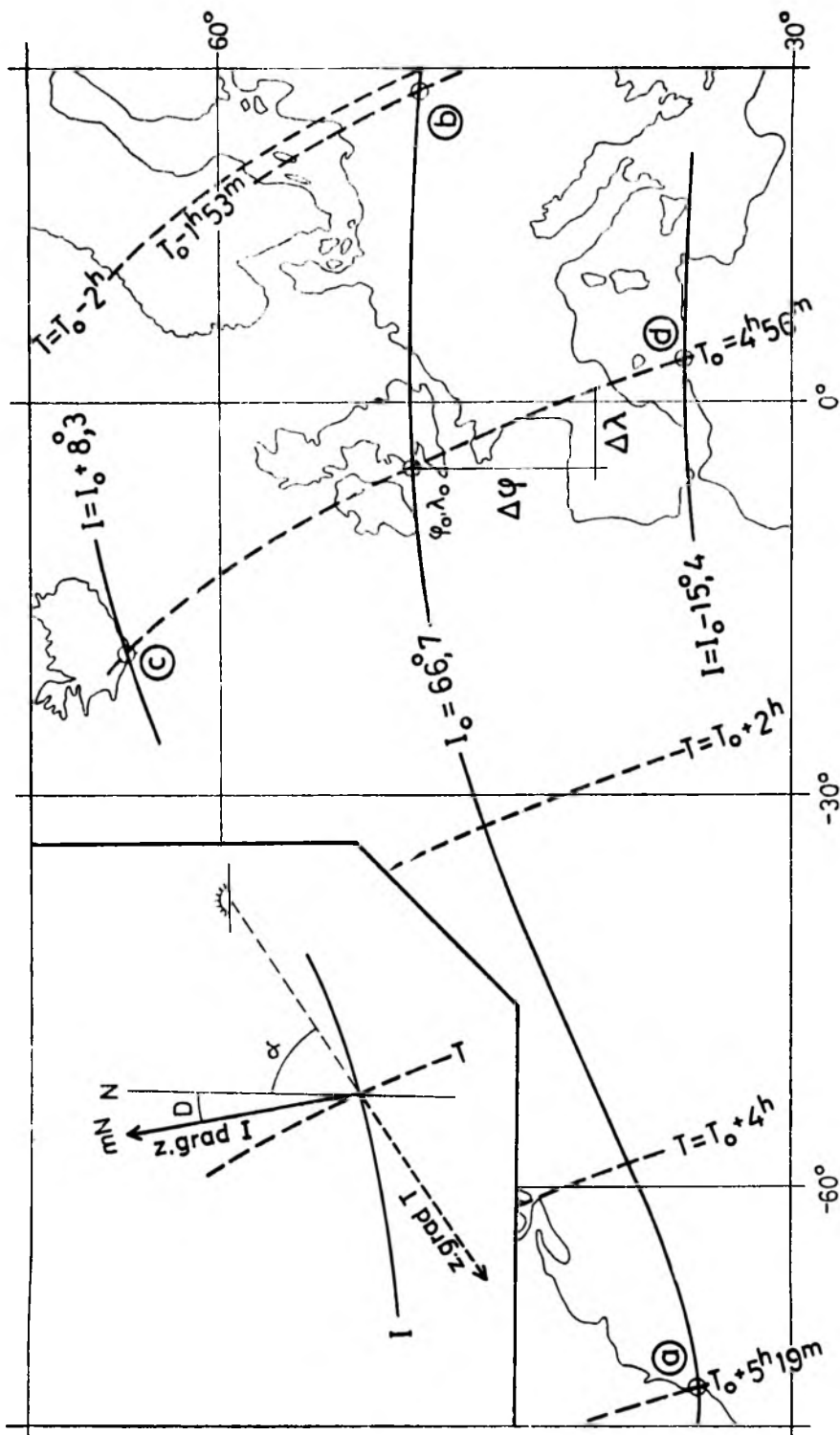
Na wszystkich punktach ptaki powinny być uwalniane podczas wschodu słońca. Spodziewane kierunki odlotu są następujące:

rejon a) — kierunek wschodzącego słońca (azymut $70^\circ, 3$),

rejon b) — kierunek przeciwny wschodzącemu słońcu (azymut $244^\circ, 0$),

rejon c) — kierunek południa magnetycznego (azymut $159^\circ, 5$),

rejon d) — kierunek północy magnetycznej (azymut $-3^\circ, 4$).



Rys. 1 — Fig. 1

Dokładne ustalenie miejsc uwalniania w poszczególnych rejonach jest możliwe dopiero po wykonaniu mikro-zdjęć magnetycznych w celu stwierdzenia lokalnego rozkładu inklinacji i deklinacji magnetycznej.

Ze względu na duży zasięg terytorialny prezentowanego projektu eksperymentu wydaje się konieczne zainicjowanie współpracy międzynarodowej dla jego ewentualnej realizacji. Pozytywne wyniki tego typu eksperymentów mogą stanowić dobrą podstawę dla dalszych, bardziej szczegółowych badań.

LITERATURA

- [1] Able K. P.: *Mechanisms of Orientation, Navigation, and Homing*. W: *Animal Migration Orientation and Navigation*, (Sidney A. Gauthreaux, red.), s. 283-373, Academic Press, 1980.
- [2] Benvenuti S., Baldaccini N. E., and Ioalé P.: *Pigeon Homing: Effect of Altered Magnetic Field During Displacement on Initial Orientation*. W: *Avian Navigation*, (Papi F., Wallraff H. G., red.), Springer-Verlag, Berlin, 1982.
- [3] Dornfeld K.: *Dependence of the Homing Pigeon's Initial Orientation on Topographical and Meteorological Variables: A Multivariate Study*. W: *Avian Navigation*, (Papi F., Wallraff H. G., red.). Springer-Verlag, 1982.
- [4] Gould J. L.: *The map sense of pigeons*. *Nature*, nr 296. s. 205-211, 1982.
- [5] Grüter M., Wiltshko R., Wiltshko W.: *Distribution of Release-Site Biases Around Frankfurt a. M., Germany*. W: *Avian Navigation*, (Papi F., Wallraff H. G., red.) Springer-Verlag, 1982.
- [6] Keeton W. T., Larkin T. S., Windsor D. M.: *Normal fluctuations in the earth's magnetic field influence pigeon orientation*. *J. Comp. Physiol.*, nr 95, s. 95-103, 1974.
- [7] Kiepenheuer J.: *Inversion of the magnetic field during transport: Its influence on the homing behavior of pigeons*. W: *Animal Migration, Navigation, and Homing*, (Schmidt-Koenig K. i Keeton W. T., red.), s. 135-142. Springer-Verlag, 1978.
- [8] Kramer G.: *Die Sonnenorientierung der Vögel*. *Verh. Deut. Zool. Ges.*, s. 72-84, Freiburg, 1953.
- [9] Papi F.: *The olfactory navigation system of pigeons*. *Verh. Deut. Zool. Ges.*, s. 184-205, 1976.
- [10] Ranvaud R., Schmidt-Koenig K., Kiepenheuer J., Gasparotto O. C.: *Initial orientation of homing pigeons at the magnetic equator with and without sun compass*. *Behav. Ecol. Sociobiol.*, nr 14, s. 77-79, Springer-Verlag, 1983.
- [11] *Rocznik Astronomiczny na rok 1987*. Państwowe Przedsiębiorstwo Wydawnictw Kartograficznych, Warszawa, 1986.
- [12] Walcott Ch.: *Anomalies in the Earth's Magnetic Field Increase the Scatter of Pigeons' Vanishing Bearings*. W: *Animal Migration, Navigation, and Homing*, (Schmidt-Koenig K., Keeton W. T., red.), s. 143-151, Springer-Verlag, 1978.
- [13] Walcott Ch.: *Is There Evidence for a Magnetic Map in Homing Pigeons?*. W: *Avian Navigation*, (Papi F., Wallraff H. G., red.), Springer-Verlag, 1982.
- [14] Wallraff H. G.: *Das Navigationssystem der Vögel*. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1974.
- [15] Wallraff H. G.: *Preferred Compass Directions in Initial Orientation of Ho-*

ming Pigeons. W: *Animal Migration, Navigation, and Homing*, (Schmidt-Koenig K., Keeton W. T., red.), s. 171-183, Springer-Verlag, 1978.

- [16] Wiltschko W., Wiltschko R.: *The role of outward-journey information in the orientation system of homing pigeons*. W: *Avian Navigation*, (Papi F., Wallraff H. G., red.), Springer-Verlag, 1982.
- [17] Żółtowski A. M.: *O nawigacji ptaków w magnetycznym polu Ziemi (On bird navigation in the Earth's magnetic field)*. Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, nr 1 (76), s. 97-111, Warszawa, 1986.
- [18] Żółtowski A. M.: *Bi-Coordinate System for Bird Navigation*. Abstracts — Résumés, XIX Congr. Int. Ornith., Ottawa, 1986.

Recenzował: doc. dr Adam Dąbrowski
Przyjęto do opublikowania w dniu 29.01.1988 r.

ANDRZEJ M. ŻÓŁTOWSKI

A possible experimental investigation of bird navigation

In this paper the following thesis is put forward: in the present state of knowledge on birds' behaviour, a determination of coordinate systems for natural navigation can be a direct purpose of experiments with homing birds. Achievement of this purpose requires keeping of certain rules. The first one — the general rule is formulated as follows:

- (I) *the experiments for determination of coordinate systems ought to be performed in natural conditions.*

There is a lot of cues for navigation. However, it can be assumed that at stated circumstances and at stated time a bird is using only one system of coordinates or even only one coordinate together with its gradient direction. The more cues appear simultaneously the more difficult is the interpretation of a bird's behaviour. Therefore the next rule is formulated.

- (II) *during the experiments a number of simultaneously available cues ought to be as small as possible and also to be unvariable.*

WALLRAFF (after [1]) determined the bi-coordinate system for bird navigation. The determination was based on pigeons' initial orientation observed at great number of release points around the loft. This system of two non-perpendicular axes X_0 and Y_0 passing thorough the loft site, and two gradient directions *grad X* and *grad Y* remain without any physical interpretation. In this paper and the previous one [17] new approach to above mentioned problem is proposed. There are some modifications and a different way of determining the bi-coordinate system. Now, the axes X_0 , Y_0 , $X = \text{const.}$, $Y = \text{const.}$ are not necessarily straight lines and they can be replaced by isolines of physical phenomena. The gradient directions observed by birds have not to be identical with direction of true (maximum) gradients *grad X* and *grad Y*. These observed gradients are called substitutional gradients (Fig. 1)*. The proposed modifications facilitate the experimental determination of coordinates. Concrete contour

* Figure ,formulas and references are in Polish text.

maps of two physical phenomena as a hypothetical bi-coordinate system, and hypothetical directions of (substitutional) gradients are together the basis for the project of experiments necessary to verify the elements of hypothesis. Release points ought to be located in the particular points of the system, especially (but not only) at the X_0 and Y_0 isolines (see example and Fig. 1). For instance a bird released at isoline X_0 should take into account *only* the direction of (substitutional) *grad Y* if, of course, hypothetical coordinates and gradients are true. Also the time of release should be adequate. Thus, a determination of the bi-coordinate system is experimentally fulfilled by verifying of assumed hypothesis. The next rule is then formulated as follows:

homing experiments should be planned and interpreted on the basis (III) of hypothetical bi-coordinate system elaborated in the form of contour maps with defined (substitutional) gradient directions.

Published results have shown that birds' navigation system can be upset among others by changes of the Earth's magnetic field during the transportation or by change of light-darkness cycle (clock-shift). So, the next rule can be formulated as follows:

during experiments, until the moment of release, the birds ought to (IV) be protected against upsetting of their navigational reading system as well as against other influences disturbing common behaviour of birds.

The implementation of this rule can be difficult. It can require special containers for transportation equipped with the control of lighting and/or with the stabilizing magnetic system. Besides, it would not be desirable to put any load on the bird and/or to do any manipulations on its body [4].

A project of a possible experiment as an example

Bi-coordinate system in the form of isolines of magnetic inclination (I), and isolines of sunrise time (T) expressed by GMT is the hypothetical basis of presented project. Isolines and substitutional gradients of I and T are shown in Figure 1. The isoline T_0 is constructed according to the formula (3.4). Azimuth of the substitutional *grad T* can be calculated after formula (3.5).

The symbols are as follows:

LT — local time of sunrise,

δ — declination (equatorial coordinate) of the sun, dependent on date,

α — azimuth of sunrise point direction.

In the approximate formulas (3.1) — (3.5) the quantities T , LT , α have relation to the center of visible sun. The navigation of a bird towards the isocline I_0 has already been discussed by author [17]. In order to reach the isocline T_0 a bird released in unknown territory watches (using its internal clock) that the sun rises too late or too early in comparison with sunrise time at the nest site. In the first case a bird ought to take the course towards the sunrise (generally eastwards) to advance the „time of meeting”. In the second case it ought to take the opposite course (generally westwards). Thus in both cases a bird is taking the course towards the isocline T_0 . It seems however that a bird can do it when a release point lies a long way from the nest site because in such situation high accuracy of internal clock is not necessary. If a distance $|T - T_0|$ is not sufficiently great, successful homing is possible (see WALLRAFF's detailed analysis [14]) but the interpretation of initial orientation is not adequate. In this case i.e. for short distance homing experiments, not sunrise but another physical phenomenon (cue) should be assumed as an hypothetical coordinate.

A possible project of experiment (valid on 1975.05.05) is shown in Figure 1. The nest site (φ_0, λ_0) is placed in Skokholm, Great Britain, as in MATTHEWS' experiment with Manx Shearwaters (*Puffinus Puffinus*). There are proposed 4 release regions (φ, λ) designated by letters a, b, c, d and placed in USA, Poland, Iceland and Algeria. The birds ought to be released at sunrise time in conditions of visible sun. Taking into account the directions of substitutional gradients of T and I the following initial orientations are expected:

- region a — towards the sunrise,
- region b — in direction opposite to the sunrise,
- region c — towards the local magnetic south,
- region d — towards the local magnetic north.

The birds ought to be transported accordingly to the rule (IV). For the final establishing of release points and for the interpretation of results it is necessary to perform micromagnetic surveys. Favourable results of such experiments can be the basis of more detailed studies.

Translation: Author

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НАТУРАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ У ПТИЦ

Резюме

Содержанием работы является новая концепция планирования экспериментов с возвратной навигацией птиц (хоминг) и интерпретация результатов этих экспериментов. Эта концепция имеет целью возможность идентификации, путем

опыта, системы координат, служащей птицам для навигации в конкретных условиях. Обоснована целесообразность применения четырех принципов при реализации представленной концепции.

I. Эксперименты должны проводиться в натуральных условиях.

II. Число навигационных указаний во время наблюдений птиц в ходе эксперимента должно быть по возможности ограниченным и неизменным.

III. Эксперименты должны быть запрограммированы и интерпретированы на основе гипотетической навигационной системы координат в виде карт изолиний двух конкретных физических явлений (с определением направлений градиентов).

IV. Во время эксперимента птицы должны быть защищены от изменения физических явлений, являющихся основой гипотетической системы координат, и других факторов, вызывающих непредвиденные реакции после их освобождения (выпуска).

Представлен здесь пример проекта эксперимента (рис. 1), содержащий положение гнезда (Скокхолм, Великобритания) и 4 района освобождения птиц подверженных эксперименту. В качестве гипотетической системы координат были приняты изолинии магнитного наклонения I [17] и изолинии времени восхода солнца T , выраженного в универсальном времени. Обоснована возможность принятия птицами направления противоположного восходу солнца, как направления, замещающего градиент T . Определены ожидаемые направления отлета птиц из места освобождения в случае правильности поставленной гипотезы.

Перевод: Róża Tolstikowa