

ANDRZEJ M. ŻÓŁTOWSKI

## O nawigacji ptaków w magnetycznym polu Ziemi

**Zarys treści.** Przedstawiony jest hipotetyczny model magnetycznego systemu nawigacyjnego, który umożliwia ptakowi określenie kierunku przemieszczenia względem izokliny przechodzącej przez gniazdo (gołębnik) oraz orientację według miejscowego południka magnetycznego. Uzasadnia się użycie map izoklin dla projektowania i analizy rezultatów prac doświadczalnych nad nawigacją i orientacją ptaków.

### 1. Wprowadzenie

Robert T. Orr [3] tak pisze:

„Badania prowadzone w ostatnich dziesięcioleciach w znacznym stopniu pogłębiły wiedzę o rozróżnianiu przez ptaki kierunków za pomocą różnych kompasów jak słoneczny, gwiazdowy, wietrzny i magnetyczny. Jednakże zdolność do odróżniania północy od południa nie wystarcza do osiągnięcia celu. Oprócz kompasu dla orientacji ptak przypuszczalnie potrzebuje także mapy do nawigacji, aby z jednej strony stwierdzić swoje położenie względem celu, z drugiej zaś aby umożliwić sobie wybór odpowiedniego kierunku kompasowego. Pomimo całego postępu w zrozumieniu zagadnienia orientacji i kompasów uboga jest nasza wiedza o tym, jak ptak określa swoją pozycję na mapie, a nawet jakie elementy astronomiczne, magnetyczne lub inne charakteryzują tę mapę. (...) Mało jest obecnie wątpliwości, że Słońce i gwiazdy mają duże znaczenie dla wielu gatunków, ale inne wskazówki też są używane w nawigacji”.

Charles Walcott [6] przedstawia koncepcję:

„Utrata orientacji przez gołębie w słabym polu anomalii magnetycznej nawet podczas słonecznej pogody sugeruje, że pole magnetyczne ma jakieś znaczenie nie tylko dla kompasu gołębia, ale i dla jego mapy. (...) Wciąż jestem przekonany, że informacja magnetyczna odgrywa jakąś rolę w nawigacji gołębi chociaż nie jesteśmy zupełnie pewni jak to się dzieje”.

Kenneth P. Able [2] konkluduje:

„Wydaje się niewątpliwe, że przynajmniej pewna liczba gatunków potrafi orientować się w kierunku celu z nieznanymi miejsc, a nam brak

wytrzymującej krytykę hipotezy dla pełnego wytłumaczenia tego zjawiska”.

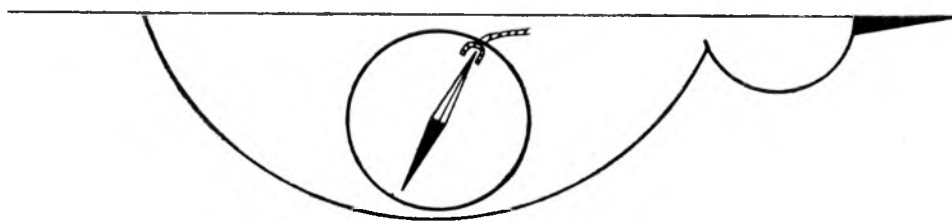
Przyjmując te cytaty jako ogólne podsumowanie aktualnego stanu wiedzy o magnetycznych i astronomicznych wskazówkach w nawigacji ptaków, przedstawiam następującą hipotezę:

gołębie, a prawdopodobnie także i inne gatunki dysponują złożonym systemem nawigacji, zaś inklinator magnetyczny może być użyty jako model magnetycznej części tego systemu.

Model ten umożliwia uzyskanie odpowiedzi na pytania, jak ptak określa swoją pozycję względem izoliny inklinacji magnetycznej (izokliny) przechodzącej przez cel (gołębnik, gniazdo) i w jaki sposób wypuszczony na nieznanym terytorium jest zdolny wyselekcjonować kierunki prowadzące do tej izokliny. Chociaż hipoteza dotyczy tylko jednej współrzędnej (inklinacji), pozwala wyjaśnić zachowanie się ptaków w wielu opisanych już eksperymentach, szczególnie podczas prób w warunkach sztucznej zmiany natężenia pola magnetycznego Ziemi. Doświadczalne potwierdzenie hipotezy niewątpliwie ułatwiłoby badania nad drugą współrzędną, z której ptaki muszą korzystać nawigując z powodzeniem do celu.

## 2. Inklinator w zastępstwie kompasu i mapy

Idea zależności między inklinacją magnetyczną a orientacją kompasową ptaków nie jest nowa (Wiltschko, według [1]). W niniejszej pracy będzie pokazane, jak zwykła igła inklinatora unieruchomiona w określonym położeniu przez czujnik nacisku może grać rolę kompasu oraz dostarczać pewnych informacji o kierunku przemieszczenia w magnetycznym polu Ziemi. W rozważaniach przyjęto normalny tzn. pozbawiony większych anomalii rozkład elementów pola na powierzchni Ziemi, w szczególności równoleżnikowy przebieg izoklin. Wartości elementów (całkowitego natężenia, składowej poziomej i pionowej oraz inklinacji) w miejscu gniazdowania oznaczone są symbolami  $F_o$ ,  $H_o$ ,  $Z_o$ ,  $I_o$ , podczas gdy  $F$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $I$  są wartościami tychże elementów w dowolnym punkcie powierzchni półkuli północnej. Schematyczne położenie igły inklinatora w stosunku do płaszczyzny symetrii ptaka jest pokazane na rysunku 1. Pionowa płaszczyzna obrotu igły jest równoległa do płaszczyzny symetrii ptaka przy



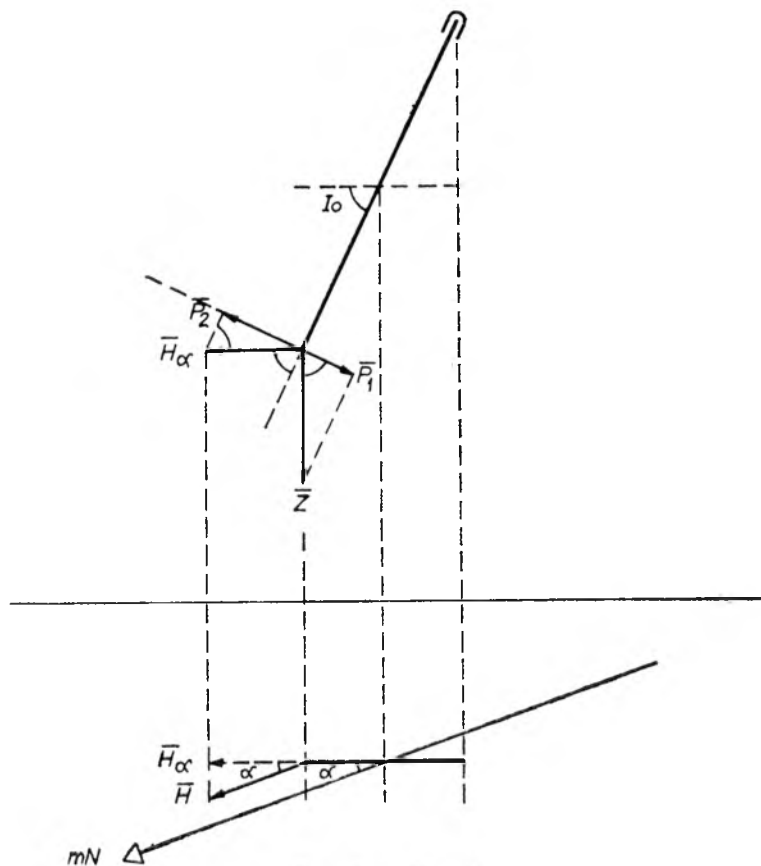
Rys. 1 — Fig. 1

czym oś obrotu przechodzi przez środek ciężkości igły. Jako dodatkowe założenia upraszczające rozważania przyjęto:

- moment magnetyczny magnesu (igły)  $M = 1$ ,
- odstęp biegunów magnesu  $2l = 1$ ,
- kąt nachylenia igły jest równy  $I_0$  niezależnie od siły obracającej igłę,

— zmiany dobowe pola magnetycznego Ziemi są pominięte.

Na rysunku 2 pokazana jest igła inklinatora w rzucie pionowym i poziomym w dowolnym polu magnetycznym na półkuli północnej ( $H > 0$ ,



Rys. 2 — Fig. 2

$Z > 0$ ) i w dowolnym azymucie magnetycznym  $\alpha$ . Siła obracająca igłę wynosi:

$$P = P_1 - P_2 \quad (2.1)$$

$$P = Z \cos I_0 - H \sin I_0 \cos \alpha \quad (2.2)$$

Przyjmuje się więc, że siła  $P$  jest dodatnia gdy jest skierowana do powierzchni Ziemi. Nacisk  $N$  na czujnik jest proporcjonalny do siły  $P$  nie-

zależnie od jej zwrotu, czyli zakładając współczynnik proporcjonalności  $k = 1$  można napisać:

$$N = |P| \quad (2.3)$$

Zmiana azymutu  $\alpha$  powoduje, że siła  $P$  zmienia się jak sinusoida osiągając minimum i maximum kiedy odpowiednio  $\alpha = 0^\circ$  i  $\alpha = 180^\circ$ .

$$P_{\min} = Z \cos I_o - H \sin I_o \quad (2.4)$$

$$P_{\max} = Z \cos I_o + H \sin I_o \quad (2.5)$$

Jest więc widoczne, że obserwując siłę  $P$  podczas obracania inklinatora w płaszczyźnie poziomej uzyskuje się możliwość wyodrębnienia lokalnego kierunku północy magnetycznej (mN) oraz przeciwnego mu (mS). Ponieważ  $Z = F \sin I$  oraz  $H = F \cos I$  można wykazać, że:

$$P_{\min} = F \sin (I - I_o) \quad (2.6)$$

$$P_{\max} = F \sin (I + I_o) \quad (2.7)$$

W miejscu gniazdowania, gdzie  $I = I_o$  oraz  $F = F_o$  będzie:

$$P_{\min} = 0$$

$$P_{\max} = F_o \sin (2I_o)$$

Należy teraz stwierdzić, jak siły  $P_{\min}$  oraz  $P_{\max}$  zmieniają swoją wartość przy przemieszczaniu inklinatora względem izokliny  $I_o$ . Przez różniczkowanie otrzymujemy:

$$dP_{\min} = dZ \cos I_o - dH \sin I_o \quad (2.8)$$

$$dP_{\max} = dZ \cos I_o + dH \sin I_o \quad (2.9)$$

gdzie  $dZ$  i  $dH$  są przyrostami wzdłuż lokalnego południka magnetycznego.

Ponieważ w magnetycznym polu Ziemi na ogół:

$$\frac{dZ}{dH} < 0,$$

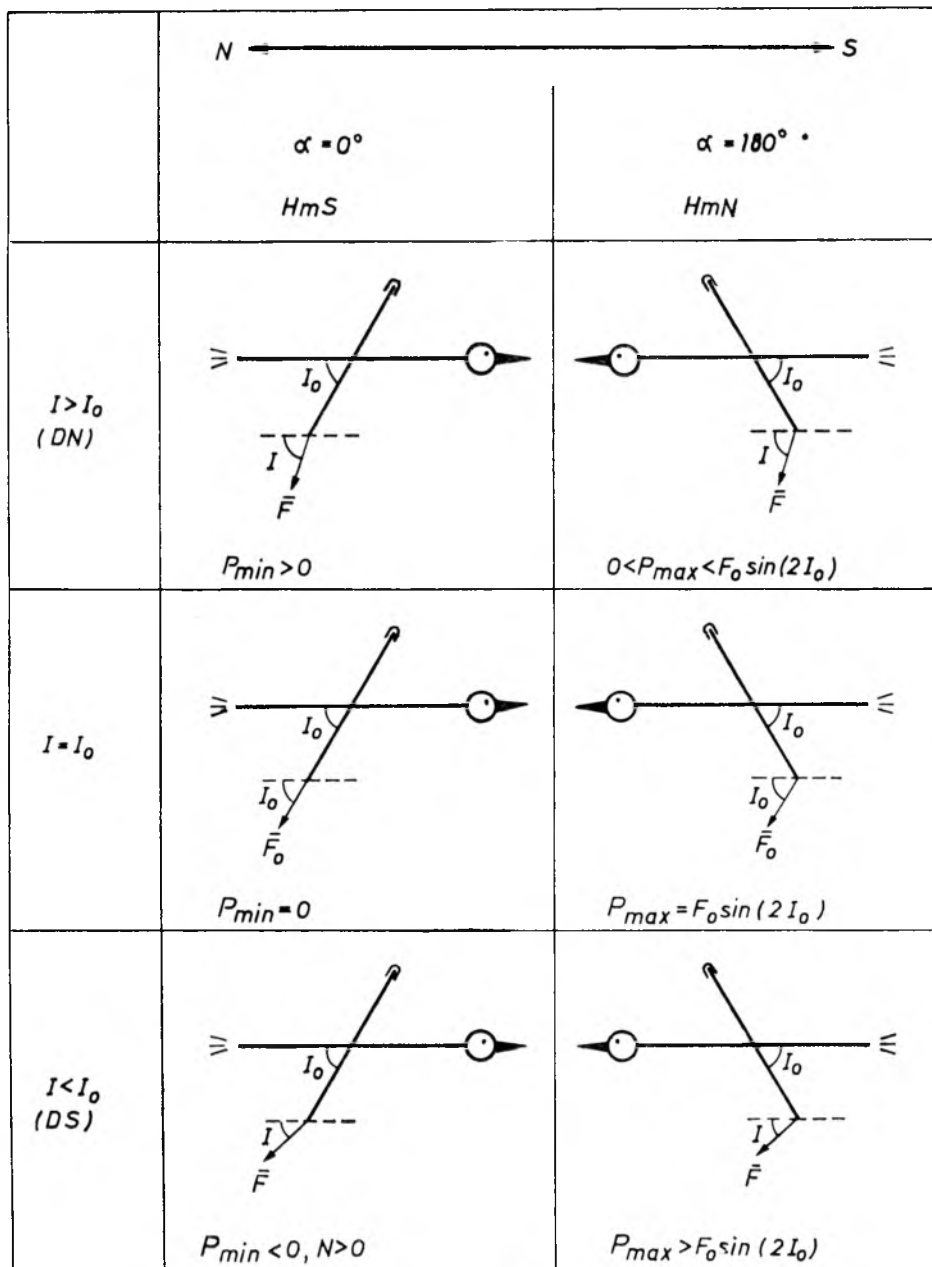
$dP_{\min}$  ma taki sam znak jak  $dZ$  tzn. przy przemieszczaniu z północy na południe siła  $P_{\min}$  maleje a z południa na północ rośnie.

Z drugiej strony dopóki:

$$\left| \frac{dZ}{dH} \right| < \operatorname{tg} I_o$$

a więc w średnich szerokościach, gdzie warunek ten jest na ogół spełniony,  $dP_{\max}$  ma taki sam znak jak  $dH$ , tzn. przy przemieszczaniu z północy na południe siła  $P_{\max}$  rośnie, a z południa na północ maleje.

Rezultaty powyższej analizy przedstawione są na rysunku 3, gdzie pokazane są pionowe przekroje inklinatora w lokalnych południkach magnetycznych, zwrot ptaka głową (Head) na północ (HmN) i południe (HmS) oraz przemieszczenie (Displacement) na północ (DN) i południe (DS) względem izokliny  $I_0$ . Należy zaznaczyć, że w rejonach anomalii



Rys. 3 — Fig. 3

magnetycznych lub w sąsiedztwie izokliny  $I_0$ , ale w większej odległości od gniazda (gołębnika), nierówności zawierające  $P_{\max}$  mogą czasem nie być spełnione. Poziome gradienty  $F$  i  $I$  (a także gradienty  $Z$  i  $H$ ) mogą być bowiem w pewnym stopniu niezależne od siebie. Jednakże ogólnie biorąc można sformułować następujące wnioski:

— jeśli obserwacja wykazuje, że  $P_{\min} = 0$ , w miejscu tym inklinacja  $I = I_0$  niezależnie od wartości  $F$ ,

— na północ od izokliny  $I_0$  siła  $P_{\min}$  jest większa, a  $P_{\max}$  mniejsza niż na izoklinie  $I_0$ , na południe zaś odwrotnie,

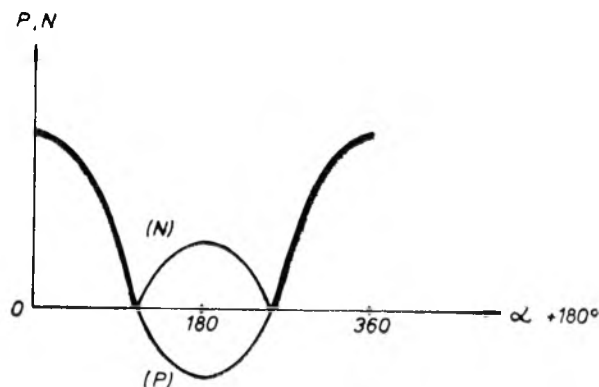
— podczas lotu ptaka z północy na południe (zwrot HmS) siła  $P_{\min}$  maleje, a z południa na północ (zwrot HmN) siła  $P_{\max}$  maleje,

— powyższe wnioski pozostają ważne po podstawieniu  $N_{\max}$  zamiast  $P_{\max}$  (zawsze) oraz po podstawieniu  $N_{\min}$  zamiast  $P_{\min}$  jeśli  $P_{\min} > 0$ .

### 3. Nawigacja ptaka w kierunku izokliny $I_0$

Ptaka uwolnionego w nieznanym mu miejscu zatacza pętlę, aby znaleźć kierunek w którym  $N$  staje się minimum. Jeśli  $N_{\min} > 0$  (wtedy również  $P_{\min} > 0$ ) ptak bierze kurs na południe (zwrot HmS) i leci tak, aby zachować minimum nacisku w każdym punkcie trasy. Kierunek lotu jest więc zawsze przeciwny kierunkowi lokalnej północy magnetycznej, tzn. lot postępuje wzdłuż południka magnetycznego, a  $N_{\min}$  zmniejsza się aż spada do zera. W tym momencie izoklina  $I_0$  jest już osiągnięta.

To było przemieszczenie na północ (DN). Nieco bardziej skomplikowane jest postępowanie po przemieszczeniu na południe (DS). Ptak zataczając pętlę znajduje dwa kierunki, w których  $N_{\min} = 0$ . Oznacza to, że  $P_{\min} < 0$  jak wynika z wykresu na rysunku 4, gdzie  $(\alpha + 180^\circ)$  jest to kurs magnetyczny ptaka podczas zataczania pętli. Przy tym przemieszczaniu występuje również wzrost wartości  $P_{\max}$  (patrz rys. 3) a więc i  $N_{\max}$ . Aby osiągnąć izoklinę  $I_0$  trzeba zmniejszyć  $N_{\max}$  czyli wziąć kurs na północ (zwrot HmN). Zachowując podczas lotu maksimum nacisku ptak



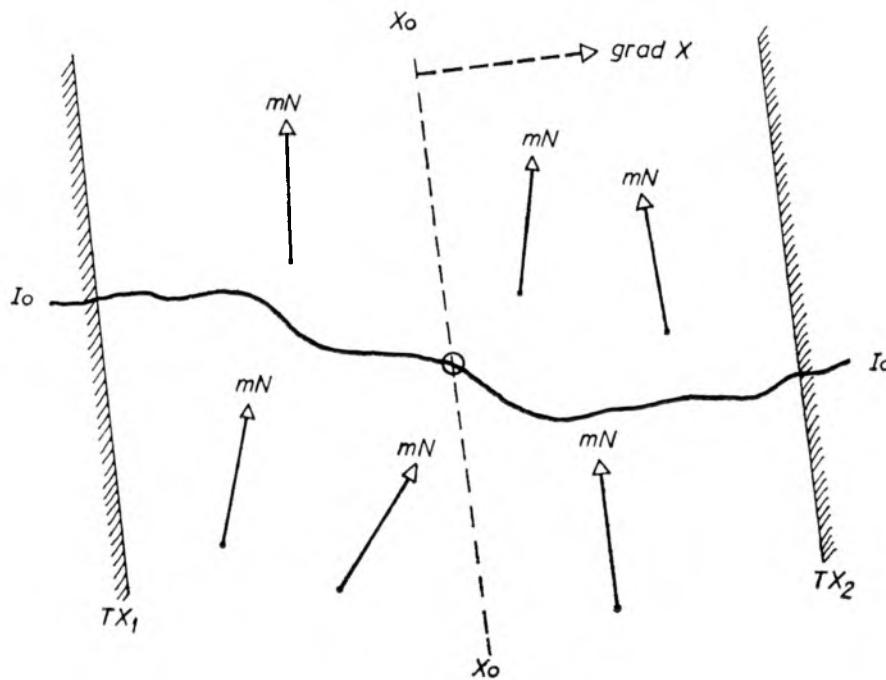
Rys. 4 — Fig. 4

utrzymuje w każdym punkcie trasy kurs zgodny z kierunkiem lokalnej północy magnetycznej. Lecąc tak wzdłuż południka magnetycznego od czasu do czasu ptak zatacza pętlę sprawdzając, czy izoklina  $I_0$  jest już osiągnięta.

Jak widać, hipotetyczna droga lotu ptaka może być dość kręta, zwłaszcza że w rejonach anomalii magnetycznych pozycja jest zapewne częściej kontrolowana. Na rozległych anomaliach, przy specyficznym układzie izoklin powrót mógłby okazać się bardzo trudny, a nawet stać się kwestią przypadku (por. [5], [6]).

\*

Wallraff (według [1]) w swojej „hipotezie zerowych osi” pokazał w sposób ogólny możliwość osiągnięcia celu jeśli w pierwszym etapie osiągnięta została jedna z osi przechodzących przez ten cel. Rozpatruje on niekoniecznie prostokątny układ współrzędnych  $X, Y$  (oznaczając przez  $X_0, Y_0$  osie przechodzące przez cel) oraz kierunki (osie) gradientów  $X$  i  $Y$ . Na rysunku 5 pokazana jest proponowana modyfikacja układu współrzędnych Wallraffa, w której oś  $Y_0$  jest zastąpiona teraz przez izoklinę  $I_0$ , a kierunek (oś)  $grad Y$  przez kierunki lokalnej północy magnetycznej (inne izolinie  $X, I$  są na rysunku pominięte). Oś  $X_0$  i kierunek  $grad X$  pozostają teoretyczne (bez fizycznej interpretacji). Znając kierunek prze-



Rys. 5 — Fig. 5

mieszczenia (DN, DS) względem izokliny  $I_o$  i kierunek (mN) gradientu  $I$ , ptak osiąga izoklinę w opisany już sposób. Wallraff zakłada, że w hipotetycznym przedziale  $TX_1—TX_2$  ptak nie jest w stanie określić kierunku przemieszczenia wzdłuż osi gradientu  $X$  ze względu na zbyt małą wartość  $|X—X_o|$ . Lecąc więc po izoklinie w przypadkowo wybranym zwrocie ptak albo trafia do celu, albo osiąga granicę przedziału  $TX_1$  względnie  $TX_2$ , gdzie może już stwierdzić kierunek przemieszczenia względem osi  $X_o$  i zmienić zwrot na przeciwny.

#### 4. Rezultaty niektórych eksperymentów w zestawieniu z hipotezą

Walcott i Green [6] wypuszczali (w znacznej odległości od gołębnika) gołębie wyposażone w cewki Helmholtza. Duża część grupy z cewkami wytwarzającymi pole skierowane do góry (typ N w górę czyli NUP) w warunkach całkowitego zachmurzenia wykazywała tendencję do odlotywania w przeciwnym kierunku niż gołębie z grupy SUP kierujące się do gołębnika. Kiedy baterie wyczerpały się lub ukazywało się słońce, gołębie z grupy NUP zawracały w kierunku gołębnika.

Rozpatrzmy doświadczenie z cewkami typu NUP. Ponieważ lokalizacja magnetycznych receptorów w ciele ptaka nie jest znana, a pole wytwarzane przez cewki nie jest jednorodne, przyjmiemy w naszej interpretacji, że pole to w otoczeniu receptora jest pionowe i ma natężenie  $2Z$  (inne założenia też są możliwe). W tej sytuacji nowa składowa pionowa  $Z(UP)$  byłaby równa  $-Z$ , a więc:

$$P(UP)_{\min} = -(Z \cos I_o + H \sin I_o)$$

$$P(UP)_{\max} = -(Z \cos I_o - H \sin I_o)$$

czyli

$$P(UP)_{\min} = -P_{\max}$$

$$P(UP)_{\max} = -P_{\min}$$

Ponieważ  $N = |P|$  łatwo jest zauważyć, że w zwrocie (HmS) gdy  $P(UP)$  jest minimum nacisk  $N$  staje się maximum, a w zwrocie (HmN) gdy  $P(UP)$  jest maximum nacisk  $N$  staje się minimum. To wyjaśnia odwrotną orientację ptaków z cewkami typu NUP. Ale kiedy ukazuje się słońce lecący ptak stwierdza, że jego orientacja magnetyczna jest fałszywa. Ponieważ ptak zmienia natychmiast kierunek lotu na przeciwny, przyjmuje zatem, że informacja o jego pozycji (przemieszczeniu) względem izokliny  $I_o$  pozostaje nadal prawdziwa. Jest to zgodne z hipotezą, gdyż określenie pozycji (DN czy DS) jest tu rzeczywiście niezależne od znaku składowej pionowej  $Z$ . Nasuwa się więc wniosek, że funkcja inklinatora umożliwiająca określenie pozycji na mapie izoklin jest dla ptaka ważniejsza i bardziej wiarygodna, niż funkcja kompasu magnetycznego, który może być zastąpiony przez inne wskazówki np. astronomiczne.



Podobny efekt przeciwnej orientacji stwierdził Wiltschko (według [1]), zmieniając znak składowej pionowej  $Z$  w doświadczalnym pomieszczeniu i obserwując jednocześnie zachowanie się rudzików. Wykazał przy tym, że całkowita eliminacja składowej pionowej dezorientuje ptaki zupełnie w warunkach braku innych wskazówek.

Wyjaśnienie efektu przeciwnej orientacji jest takie samo jak powyżej. Całkowita eliminacja składowej pionowej ( $Z = 0$ , tak jak na równiku magnetycznym) powoduje, że  $P_{\min} = -P_{\max}$  czyli  $N_{\min} = N_{\max}$  i ptak nie może w takich warunkach określić właściwego kierunku lotu.

\*

Sedlak [4] pisze: „Teoria bez perspektyw badawczych jest anemiczna już w chwili powstania i zasadniczo bezcelowa”. Jako cel ewentualnych badań można by w tym miejscu zaproponować stwierdzenie korelacji między zachowaniem się ptaków a rozkładem izoklin. Badania takie wymagałyby w pierwszej kolejności:

- dodatkowej analizy niektórych dotychczasowych wyników doświadczeń,
- wykonania odpowiednich map magnetycznych dla rejonów doświadczeń,
- eksperymentalnego potwierdzenia (lub negacji) elementów hipotezy.

#### L I T E R A T U R A

- [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] Able K. P.: *The Limits of Technology*. W: *Point Reyes Bird Observatory Newsletter*, nr 51, s. 5—7, 1983.
- [3] Orr R. T.: *Avian Migration: An Introduction*. W: *Point Reyes Bird Observatory Newsletter*, nr 61, s. 2—4, 1983.
- [4] Sedlak W.: *Bioelektronika — Środowisko i Człowiek*. Nauka dla wszystkich, nr 318, PAN, Kraków, 1980.
- [5] Walcott Ch.: *Anomalies in the Earth's Magnetic Field Increase the Scatter of Pigeons' Vanishing Bearings*. W: *Animal Migration, Navigation, and Homing*, (K. Schmidt-Koenig i W. T. Keeton, red.), s. 143—151, Springer-Verlag, 1978.
- [6] Walcott Ch.: *Bird Orientation and the Earth's Magnetic Field*. W: *Point Reyes Bird Observatory Newsletter*, nr 61, s. 8—11, 1983.

Recenzował: doc. dr Adam Dąbrowski

ANDRZEJ M. ZOŁTOWSKI

## On bird navigation in the Earth's magnetic field

### 1. Hypothesis

In the present paper the following hypothesis is put forward: magnetic dip needle can be used as a model of the magnetic system of navigation which enables us to answer the question: how a bird determines its position in relation to isocline passing through a goal, and how it is able to select the directions leading toward this isocline. Though the hypothesis concerns only one of two indispensable coordinates, in connexion in the matter in hand, it allows to explain the results of many previously published experiments of birds' behaviour, especially under conditions of artificial magnetic fields. Moreover, finding of one coordinate would facilitate the course of searching for the second coordinate.

### 2. Magnetic dip needle (inclinometer) instead of the compass and the map

The knowledge of relation between magnetic inclination and birds' compass orientation is not new (Wiltschko, after [1]). Now it will be shown how a simple dip needle, immobilized by gauge of pressure in the defined position, may play the role of a compass, and give some information about its position on the magnetic map. To simplify the description, the normal distribution of isoclines (without greater anomalies) is set up. On the northern hemisphere inclination  $I$  varies from  $0^\circ$  on the magnetic equator to  $90^\circ$  on the magnetic north pole. Elements (total intensity, horizontal and vertical components, inclination) of the Earth's magnetic field in the site of nest or loft (a goal) are signed by symbols  $F_o$ ,  $H_o$ ,  $Z_o$ ,  $I_o$  and  $F$ ,  $H$ ,  $Z$ ,  $I$ , respectively, at any place on the northern hemisphere. The hypothetic position of the dip needle in relation to the bird's plane of symmetry is shown in Figure 1.

The plane of rotation (this rotation is limited by the gauge) of the dip needle is vertical, and the axis of rotation passes through the centre of mass of the needle. The gauge transmits impulses caused by pressure of the needle. The pressure rises as a result of variation of magnetic inclination. In the further part of the paper it will be shown how the information can be acquired from such an inclinometer.

Now, we assume the following conditions:

- magnetic moment of the needle (magnet)  $M = 1$ ,
- distance between the poles of the magnet  $2l = 1$ ,
- dip angle of the needle is equal to  $I_o$ , independently of a force turning the needle,
- daily variations of the Earth's magnetic field are neglected.

In Figure 2 vertical and horizontal projections of the dip needle are shown in any magnetic field of the northern hemisphere ( $H > 0, Z > 0$ ), and in any magnetic azimuth  $\alpha$ . The force turning the needle takes the following form:

$$P = P_1 - P_2 \quad (2.1)$$

$$P = Z \cos I_o - H \sin I_o \cos \alpha \quad (2.2)$$

Thus, the force  $P$  is assumed to be positive when its direction is oriented toward the Earth's surface. Pressure  $N$  on the gauge depends on the force  $P$ , independently of its turn. Assuming proportionality factor  $k = 1$ , we may write that

$$N = |P| \quad (2.3)$$

The variation of azimuth  $\alpha$  causes that the force  $P$  changes like sine curve, reaching minimum and maximum in the local magnetic meridian, i.e. when  $\alpha = 0^\circ$  and  $\alpha = 180^\circ$ , respectively. It may be expressed by the following formulas:

$$P_{\min} = Z \cos I_o - H \sin I_o \quad (2.4)$$

$$P_{\max} = Z \cos I_o + H \sin I_o \quad (2.5)$$

Accordingly, it is seen that watching the force  $P$ , while the inclinometer is turning in the horizontal plane, it is possible to separate the directions of the local magnetic north (mN), and the local magnetic south (mS). Since  $Z = F \sin I$  and  $H = F \cos I$  the formulas (2.4) and (2.5) take the form as follows:

$$P_{\min} = F \sin (I - I_o) \quad (2.6)$$

$$P_{\max} = F \sin (I + I_o) \quad (2.7)$$

In the nest or loft site, where  $I = I_o$  and  $F = F_o$ , the forces may be expressed as:

$$P_{\min} = 0$$

$$P_{\max} = F_o \sin (2I_o)$$

The next thing to do is to find how the values of forces  $P_{\min}$  and  $P_{\max}$  undergo changes, when inclinometer is being displaced in relation to iso-

cline  $I_o$ . On respective differentiation, we arrive at the following formulas:

$$dP_{\min} = dZ \cos I_o - dH \sin I_o \quad (2.8)$$

$$dP_{\max} = dZ \cos I_o + dH \sin I_o \quad (2.9)$$

where  $dZ$  and  $dH$  denote the increments along the local magnetic meridian, respectively. Because in the Earth's magnetic field, along the magnetic meridian, generally

$$\frac{dZ}{dH} < 0$$

so  $dP_{\min}$  has the same sign as  $dZ$ . It means that during the displacement from the north toward the south the force  $P_{\min}$  decreases, whereas from the south toward the north it increases. On the other hand, if

$$\left| \frac{dZ}{dH} \right| < \tan I_o$$

(at middle latitudes this condition is fulfilled in the main),  $dP_{\max}$  has the same sign as  $dH$ . It means that during the displacement from the north toward the south the force  $P_{\max}$  increases, whereas from the south toward the north it decreases.

The results following from the analysis carried out are presented in Figure 3. There are vertical sections of the inclinometer in local magnetic meridians. The bird's turns toward the north (HmN) and toward the south (HmS) as well as its displacements (DN, DS) in respect to isocline  $I_o$  are also marked. In normal distribution of the Earth's magnetic field the following conclusions may be drawn:

- if the observation at any point indicates that  $P_{\min} = 0$  at that place, the inclination  $I = I_o$ , independently of  $F$  value,
- northwards of isocline  $I_o$  the force  $P_{\min}$  is greater and  $P_{\max}$  is smaller than in the nest (loft) site, while southwards of isocline  $I_o$  inversely,
- during the bird's flight toward the south (turn HmS) the force  $P_{\min}$  decreases and toward the north (turn HmN) the force  $P_{\max}$  decreases, too,
- the above suggestions are valid after substituting  $N_{\max}$  instead of  $P_{\max}$  (always) and after substituting  $N_{\min}$  instead of  $P_{\min}$  if  $P_{\min} > 0$ .

### 3. Bird's navigation toward isocline $I_o$

A bird released in unfamiliar territory makes a loop, in order to find the direction in which pressure  $N$  reduces to minimum.

If  $N_{\min} > 0$  ( $P_{\min} > 0$ ), the bird takes a course toward the magnetic south (turn HmS) to decrease  $N_{\min}$ , and it keeps minimum of the pressure

$N$  at each point of the route, i.e. the flight proceeds along the magnetic meridian. When  $N_{\min}$  reaches the vanishing point, the isocline  $I_o$  is already reached.

The above views concern the displacement of the bird northwards (DN). A more complex behaviour occurs after its displacement southwards (DS). The bird making a loop finds two directions in which  $N_{\min} = 0$ . It means that  $P_{\min} < 0$ , as it is seen in Figure 4, where  $(\alpha + 180^\circ)$  stands for the bird's magnetic course. At this displacement an increase of  $N_{\max}$  ( $P_{\max}$ ) value is observed. In order to decrease it, the bird takes a course toward the magnetic north (turn HmN), and keeps maximum of the pressure  $N$  during its flight. Flying along the magnetic meridian, the bird makes a loop from time to time testing whether the isocline  $I_o$  has been reached by now.

As can be observed, the bird's hypothetical flight may be something twisting, in particular in the regions of magnetic anomalies, where its position is undoubtedly often controlled. In the regions of wide anomalies with the specific distribution of isoclines the bird's return might become particularly difficult (see [5], [6]).

One can offer now a proposal concerning a physical meaning of  $Y$  coordinate in Wallraff's general "null-axes hypothesis" (after [1]). The  $Y_o$  axis may be replaced by isocline  $I_o$  and direction of *grad*  $Y$  by directions of the local magnetic north in any point of the plane  $X, I$ . The  $X$  coordinate still remains theoretical, without any physical interpretation. Thus, the modified Wallraff's bi-coordinate system  $X, I$  can be proposed. This system is presented in Figure 5, where only isolines  $X_o$  and  $I_o$  passing through a goal are shown. The navigation toward isocline  $I_o$  has already been described in this section of the paper.

After the Wallraff's assumption,  $TX_1$  and  $TX_2$  are the hypothetical  $X$  values, where  $|X - X_o|$  value is already so great that a direction of displacement along  $Y_o$  axis (now isocline  $I_o$ ) can be perceived by the bird. Therefore, outside the section  $TX_1 - TX_2$  the bird has a hypothetical ability of choosing the course leading toward a goal along the isocline  $I_o$ .

#### 4. Hypothesis and some previous experiments

Walcott and Green [6] released some pigeons equipped with Helmholtz coils away from the loft. The group with coils producing a field pointing up through the bird's head (type North-Up or NUP) under solid overcast sky tended to fly off in the opposite direction to those pigeons from the group with the SUP coils directing homeward. When batteries died or the sun appeared, the pigeons carrying the NUP coils would return to the loft.

Now, let us take into consideration the NUP group. As a locality of magnetic sensor in a bird's body is unknown so far, and the magnetic

field produced by coils is nonhomogeneous, thus to simplify the interpretation of that phenomenon, we shall assume that this field surrounding the sensor is vertical, and its intensity equals  $2Z$  (less restrictive assumptions are also possible). The resultant  $Z$ -component would be then  $Z(UP) = -Z$ .

According to formulas (2.4) and (2.5)

$$P(UP)_{\min} = -(Z \cos I_o + H \sin I_o)$$

$$P(UP)_{\max} = -(Z \cos I_o - H \sin I_o)$$

or

$$P(UP)_{\min} = -P_{\max}$$

$$P(UP)_{\max} = -P_{\min}$$

Since  $N = |P|$  it is easy to notice that in the turn (HmS), when  $P(UP)$  is minimum, the pressure  $N$  reaches its maximum, and in the turn (HmN), when  $P(UP)$  is maximum, the pressure  $N$  reaches its minimum. It allows to explain the reversal orientation of pigeons carrying the NUP coils. However, when the sun appears the flying bird realizes that its magnetic orientation is false. As the bird takes rapidly the opposite direction of the flight, thus it assumes that information about its position in relation to the isocline  $I_o$  remains true. And so the role of inclinometer as a "map" seems to have a priority over its role as a „compass". In compliance with the hypothesis, the information about the bird's position (DN or DS) is indeed independent of a sign of the  $Z$ -component.

Similar effect of the reversal orientation was ascertained by Wiltschko (after [1]). Namely, he observed the robin's behaviour after changing the sign of the vertical  $Z$ -component inside the cage. He also noticed that the total elimination of the  $Z$ -component caused the bird's disorientation.

The effect of the reversal orientation has been explained above. Total elimination of the vertical component ( $Z = 0$ ) causes that  $P_{\min} = -P_{\max}$  otherwise  $N_{\min} = N_{\max}$ . The bird cannot choose a proper turn in such conditions.

\*

A purpose of further investigations would be a detection of a correlation between homing bird's behaviour and distribution of isoclines. Such investigations ought to cover:

- performance of suitable magnetic maps of the chosen experimental grounds,
- experimental endorsement or negation of the hypothesis,
- reanalysis of some previously published results of the experiments carried out.

АНДЖЕИ М. ЖУЛТОВСКИ

## О НАВИГАЦИИ ПТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

### Резюме

В данной работе представлена гипотетическая модель магнитной навигационной системы, которая дает возможность птицам возвращаться в гнезда (голубятни) на значительные расстояния. Такой моделью является обыкновенный магнитный инклипатор, магнитная стрелка которого застопорена в определенном положении датчиком, принимающим нажим конца стрелки. Этот нажим (давление) возникает в результате воздействия составляющих магнитного поля Земли на стрелку в плоскости её вращения.

Показано, как птица может определить свое положение относительно изоклины, проходящей через цель (гнездо, голубятня), и каким образом после выпуска её на незнакомой территории способна выбрать направления, ведущие к этой изоклине. Представлено гипотетическое объяснение поведения птиц, поданных экспериментам с изменением направления вертикальной составляющей  $Z$  магнитного поля Земли. Предложено исследование с целью установления корреляции между навигацией птиц и ходом изоклин.

Перевод: Роза Толстикова

## SPIS TREŚCI

### BOHDAN BOHONOS

- Problem dwuetapowego przetwarzania nadirowego zdjęć fotogrametrycznych o dużych kątach nachylenia . . . . . 3

### JAN JASIŃSKI

- Wpływ postępowego ruchu samolotu w czasie ekspozycji na metryczność obrazu optycznego . . . . . 39

### TADEUSZ WYRZYKOWSKI

- Kilka elementów analizy dokładności sieci niwelacji I klasy (pomiar z lat 1974—79) . . . . . 57

### KRZYSZTOF CZERWIŃSKI

- Udoskonalona metoda rejestracji i opracowania rezultatów obserwacji przejść gwiazd przez płaszczyznę południka . . . . . 71

### JERZY MAJOWICZ

- Nowe stałe astronomiczne i nowy system fundamentalny oraz konsekwencje ich wprowadzenia na obliczanie efemeryd astronomicznych dla celów geodezyjnych . . . . . 81

### ANDRZEJ M. ŻÓŁTOWSKI

- O nawigacji ptaków w magnetycznym polu Ziemi . . . . . 97



## CONTENTS

### BOHDAN BOHONOS

- The problem of two-stage nadir rectifying of largely tilted photographs 3

### JAN JASINSKI

- Influence of a plane translatory movement at the moment of exposure on metric properties of an optical image . . . . . 39

### TADEUSZ WYRZYKOWSKI

- Some elements of an accuracy analysis of the I class levelling network — carried out on the data of surveys, made in the years 1974—79 57

### KRZYSZTOF CZERWIŃSKI

- The improved method of registration and processing of the results from observations of stars transits . . . . . 71

### JERZY MAJOWICZ

- New astronomical constants and the new fundamental system as well as their implications for computing astronomical ephemerides for geodetic purposes . . . . . 81

### ANDRZEJ M. ZOŁTOWSKI

- On bird navigation in the Earth's magnetic field . . . . . 97

## СОДЕРЖАНИЕ

### БОГДАН БОХОНОС

- Проблема двухэтапного надирного трансформирования фотограмметрических снимков с большими углами наклона . . . . . 3

### ЯН ЯСИНЬСКИ

- Влияние поступательного движения самолета во время экспозиции на метричность оптического изображения . . . . . 39

### ТАДЭУШ ВЫЖИКОВСКИ

- Несколько элементов анализа точности нивелирной сети I класса (измерения 1974—79 годов) . . . . . 57

### КШИШТОФ ЧЕРВИНЬСКИ

- Совершенствованный метод регистрации и обработки результатов наблюдений перехода звезд через плоскость меридиана . . . . . 71

### ЕЖИ МАЕВИЧ

- Новые астрономические постоянные и новая фундаментальная система, и также последствия их ввода в вычисление астрономических эфемерид для геодезических целей . . . . . 81

### АНДЖЕЙ М. ЖУЛТОВСКИ

- О навигации птиц в магнитном поле Земли . . . . . 97