

УДК 591.185.1 : 598.2

СОЛНЕЧНАЯ НАВИГАЦИЯ ПТИЦ**Г. К. Назарчук, А. Б. Кистяковский, Л. А. Смогоржевский, Л. М. Шульман**(Киевский планетарий, Киевский государственный университет,
Главная астрономическая обсерватория АН УССР)

Многочисленные эксперименты по хомингу и ориентации птиц в круглой клетке доказывают, что у птиц существует чувство направления. Поскольку единственным визуальным ориентиром в дневное время является Солнце, то результаты поставленных экспериментов обычно рассматриваются как доказательство солнечной ориентации птиц. Такой вывод может вызвать возражение, т. к. кроме визуальных (Солнце, местные предметы) существуют и другие ориентиры, воспринимаемые не зрительным путем (магнитное поле Земли и пр.). Прямое подтверждение солнечной навигации птиц получено Крамером (Kramer, 1957), который с помощью зеркал искусственно менял азимут Солнца.

Чтобы выяснить, действительно ли Солнце служит ориентиром для птиц, ряд авторов предпринял количественную разработку теории солнечной навигации птиц. Простейшее предположение о способе навигации принадлежит Танмору*. Согласно этому предположению, единственным ориентирующим параметром является высота Солнца над горизонтом. Т. к. по этой гипотезе типичная ошибка в выборе направления равна 30—40° (иногда она достигает 90°), то гипотезу следует отбросить.

Первой серьезной разработкой механизма ориентации птиц следует признать работу Метьюза (Matthews, 1953). По его гипотезе, птица определяет высоту и азимут Солнца, экстраполирует высоту Солнца к полудню, сравнивает с высотой Солнца дома и определяет курс полета. Другой вариант солнечной навигации предложил в 1957 г. Пенникуик (Penpuquick, 1960). Согласно его гипотезе, основанной на идее Крамера, ориентирующими параметрами являются не азимут и высота Солнца, а высота Солнца и скорость ее изменения. Линии равных высот Солнца и равных производных высоты по времени образуют на Земле координатную сетку, аналогичную географической. Очевидно, что и гипотеза Метьюза, и гипотеза Пенникуика — частные примеры способов ориентации по Солнцу, далеко не исчерпывающие всех возможных вариантов. Чтобы установить, каким именно способом ориентируется птица, нужен, во-первых, отбор способов, требующих наименее точных наблюдений, во-вторых, тщательный анализ экспериментального материала с целью выявления связи между особенностями навигации птиц и пространственно-временным ходом ориентирующих параметров. Не исключено, что птица пользуется не одним каким-то способом навигации, как это свойственно человеку, выполняющему расчеты по выбранному алгоритму, а реагирует сразу на всю совокупность ориентирующих параметров. В этом случае в поведении птицы все равно проявятся черты «наименее тонкого» способа навигации. Определение такого способа и анализ экспериментов по хомингу со скворцом обыкновенным (*Sturnus vulgaris* L.) и тремя видами ласточек: городской (*Delichon urbica* L.), деревенской (*Hirundo rustica* L.) и береговой (*Riparia riparia* L.) — и составляет цель нашей работы.

* Цит. по Д. Гриффину (1966).

Варианты солнечной навигации

Всякая навигационная задача состоит в том, чтобы, находясь в точке с координатами (φ_1, λ_1) , определить курс к другому пункту с координатами (φ_2, λ_2) . Обычно курс отсчитывается от меридиана и представляет собой азимут места назначения. Мы рассматриваем случай, когда единственным ориентиром является Солнце, поэтому подобный подход неприменим.

Естественно допустить, что при чисто солнечной навигации курсовой угол определяется также по отношению к Солнцу и представляет собой разность между азимутом Солнца в исходном пункте A_{\odot} и азимутом пункта назначения A . В рассматриваемом случае азимут Солнца не является измеримой величиной и должен быть исключен из числа ориентирующих параметров. В набор ориентирующих параметров войдут лишь величины, которые можно определить, наблюдая Солнце и линию горизонта, т. е. высота Солнца h_{\odot} и ее производные по времени:

$$h_{\odot}; \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s}; \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s^2} \dots \quad (1)$$

и производные от азимута Солнца:

$$\frac{\partial A_{\odot}}{\partial s}; \frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial s^2}; \frac{\partial^3 A_{\odot}}{\partial s^3} \dots \quad (1')$$

При постановке задачи мы исходили из предположения, что птица обладает чувством времени и наблюдательностью, иными словами, что для любого момента времени ей известна солнечная дуга в пункте назначения (дом), т. е. весь бесконечный набор величин (1) и (1'). Считали, что птица определяет величину $(A - A_{\odot})$ путем сравнения наблюдаемых значений каких-либо величин из чисел (1), (1') с их значениями в данный момент в пункте назначения.

Нетрудно убедиться в том, что минимальное число ориентирующих параметров равно двум. Действительно, произвольный ориентирующий параметр ψ из чисел (1), (1') зависит от широты, долготы и эфемеридного времени:

$$\psi_{1,2} = \psi_{i,2}(\varphi_{1,2}, \lambda_{1,2}, s). \quad (2)$$

Этими же величинами определяется азимут Солнца:

$$A_{\odot} = A_{\odot}(\varphi_{1,2}, \lambda_{1,2}, s).$$

Азимут пункта назначения зависит от координат обоих пунктов и не зависит от времени:

$$A = A(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2).$$

Таким образом, определенный выше курсовой угол определяется пятью величинами:

$$A - A_{\odot} = F(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2, s), \quad (3)$$

из которых четыре: $\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2$ — входят в выражение (3) как параметры. Эти параметры, не являясь непосредственно наблюдаемыми величинами, подлежат исключению. Очевидно, что для исключения четырех величин из (3) необходимо две пары соотношений вида (2): два соотношения для пункта вылета и соответствующие им соотношения для пункта назначения.

Теоретически совершенно безразлично, какие именно две величины из чисел (1), (1') выбраны в качестве ориентирующих параметров. Более того, такими параметрами могут служить две произвольные, но независимые функции этих же величин:

$$\begin{aligned} \Psi_1 \left[h_{\odot}; \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s}; \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s^2} \dots \frac{\partial A_{\odot}}{\partial s}; \frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial s^2}; \frac{\partial^3 A_{\odot}}{\partial s^3} \right], \\ \Psi_2 \left[h_{\odot}; \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s}; \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s^2} \dots \frac{\partial A_{\odot}}{\partial s}; \frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial s^2}; \frac{\partial^3 A_{\odot}}{\partial s^3} \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Выполнив подстановку (2) в (4), получим две пары соотношений вида:

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \Psi_1(\varphi, \lambda, s), \\ \Psi_2 &= \Psi_2(\varphi, \lambda, s). \end{aligned} \quad (5)$$

Независимость функций Ψ_1 и Ψ_2 следует понимать в смысле

$$\frac{D(\Psi_1, \Psi_2)}{D(\varphi, \lambda)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial \Psi_1}{\partial \varphi} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial \varphi} \\ \frac{\partial \Psi_1}{\partial \lambda} & \frac{\partial \Psi_2}{\partial \lambda} \end{vmatrix} \neq 0. \quad (6)$$

Как видим, частный случай, рассмотренный Пенникуиком, соответствует выбору

$$\Psi_1 = h_{\odot}, \quad (7)$$

$$\Psi_2 = \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \quad (8)$$

и является одним из бесконечного числа возможных способов навигации.

Необходимость двух ориентирующих параметров делает невозможным мгновенное определение курса, т. к. мгновенно определяется только один параметр h_{\odot} . Поэтому очевидно, что процедура определения курса требует некоторого конечного промежутка времени. Поскольку высота Солнца легче всего определяется из наблюдений, то выбор h_{\odot} в качестве одного из параметров не вызывает сомнений. Остается обсудить выбор второго параметра.

За конечный промежуток времени Δs Солнце сместится по вертикали на угол

$$\Delta h_{\odot} = \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \Delta s + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s^2} (\Delta s)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 h_{\odot}}{\partial s^3} (\Delta s)^3 + \dots \quad (9)$$

и по горизонтали — на угол

$$\Delta A_{\odot} \cos h_{\odot}, \quad (10)$$

где

$$\Delta A_{\odot} = \frac{\partial A_{\odot}}{\partial s} \Delta s + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial s^2} (\Delta s)^2 + \frac{1}{6} \frac{\partial^3 A_{\odot}}{\partial s^3} (\Delta s)^3 + \dots \quad (11)$$

За исключением некоторых точек на солнечной дуге, т. е. почти все время, каждый из последующих членов рядов (9) и (11) меньше предыдущих. Порядок малости членов определяется степенью, в которую

входят в член промежутков времени Δs и малые приращения других величин.

Поскольку исходное предположение заключается в том, что птица определяет курс путем сравнения ориентирующих параметров в месте выпуска и в пункте назначения, то целесообразно установить порядок малости величин, на основании которых происходит ориентация. Если птица сравнивает высоту Солнца у себя дома и в пункте вылета в данный момент, то тем самым определяется величина первого порядка малости:

$$h_{\odot 1} - h_{\odot 2} \approx \frac{\partial h_{\odot}}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial h_{\odot}}{\partial \lambda} \Delta \lambda, \quad (12)$$

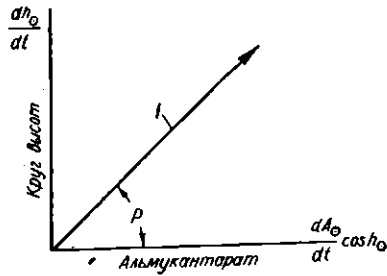


Рис. 1. Позиционный угол Солнца (P):
I — направление движения Солнца.

где $\Delta \varphi$ и $\Delta \lambda$ — соответственно разности широт и долгот двух пунктов. Если принять предложение Пенникуика — Крамера о выборе в качестве второго параметра $\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s}$, то птице придется определять

$$\left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right)_2 - \left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right)_1 \approx \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s \partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s \partial \lambda} \Delta \lambda \quad (13)$$

или фактически

$$\Delta h_{\odot 2} - \Delta h_{\odot 1} \approx \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s \partial \varphi} \Delta s \Delta \varphi + \frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial s \partial \lambda} \Delta s \Delta \lambda, \quad (14)$$

т. е. величину второго порядка малости.

Возникает вопрос, нельзя ли выбрать второй ориентирующий параметр таким образом, чтобы определению подлежала величина не второго, а первого порядка малости. Этот параметр определялся бы из наблюдений легче и относительно точности навигации был бы равноправен с h_{\odot} .

Легко увидеть, что таким параметром является позиционный угол движения Солнца, т. е. угол P между линией, параллельной горизонту (альмукантаратом) и направлением перемещения Солнца по небу. Позиционный угол (рис. 1) определяется соотношением

$$\operatorname{tg} P = \frac{\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s}}{\cos h_{\odot} \frac{\partial A_{\odot}}{\partial s}}, \quad (15)$$

азимут A отсчитывается, как принято в астрономии, от точки юга к западу. Очевидно, что величина P , определяемая как отношение двух величин первого порядка, сама является величиной нулевого порядка малости. Следовательно, разность

$$P_2 - P_1 = \frac{\partial P}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial P}{\partial \lambda} \Delta \lambda \quad (16)$$

так же, как и разность высот, — величина первого порядка. Разумеется, тем же приемом можно сконструировать бесчисленное множество ве-

личин первого порядка малости, однако только P имеет наглядный геометрический смысл.

Основываясь на изложенных соображениях, мы утверждаем, что оптимальными ориентирующими параметрами для солнечной навигации являются высота и позиционный угол движения Солнца.

Навигация по высоте и позиционному углу Солнца

Покажем, что если птица в состоянии определить h_{\odot} и P в точке, где она находится, и помнит значение этих величин в данный момент времени дома, то она всегда может определить курс к дому, используя в качестве ориентира Солнце.

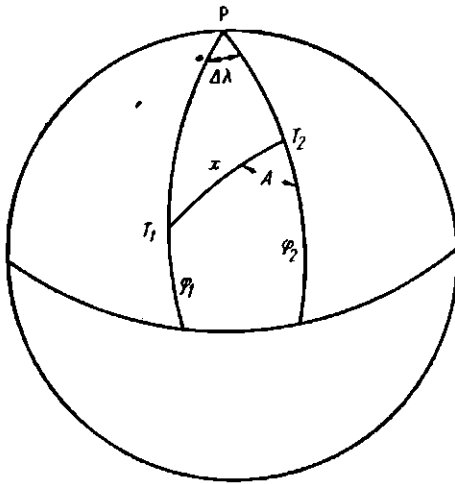


Рис. 2. Земной шар:

P — полюс; T_1 — дом птицы; T_2 — место выпуска; $\Delta\lambda$ — разность долгот точки дома и места выпуска; A — азимут направления полета птицы; φ_1 — широта дома; φ_2 — широта места выпуска.

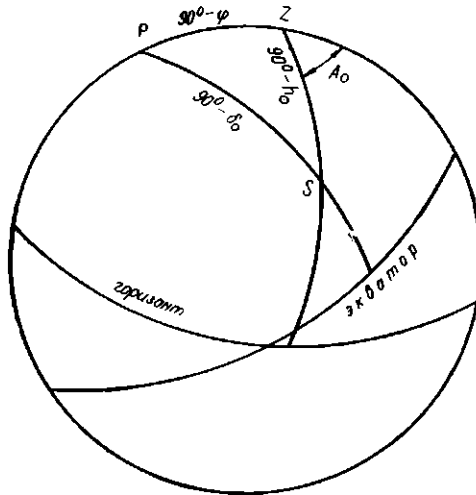


Рис. 3. Небесная сфера и параллактический треугольник на ней:

P — полюс; Z — зенит; S — положение Солнца; δ_{\odot} — склонение Солнца; h_{\odot} — высота Солнца над горизонтом; A_{\odot} — азимут Солнца; φ — широта данного места.

Представим земной шар в виде сферы и обозначим: T_1 — дом птицы, T_2 — место вылета. Тогда угол между меридианом в точке вылета и направлением к дому будет азимутом дома A (рис. 2). В сферическом треугольнике T_1PT_2 φ_1 — широта дома, φ_2 — широта места вылета, $\Delta\lambda$ — разность долгот указанных двух пунктов. Из треугольника находим

$$\frac{\sin x}{\cos \varphi_1} = \frac{\sin \Delta\lambda}{\sin A} \quad (17)$$

$$-\sin x \cos A = \sin \varphi_1 \cos \varphi_2 - \cos \varphi_1 \sin \varphi_2 \cos \Delta\lambda \quad (18)$$

Азимут дома равен

$$\operatorname{ctg} A = \sin \varphi_2 \operatorname{ctg} \Delta\lambda - \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cos \varphi_2}{\sin \Delta\lambda} \quad (19)$$

Азимут Солнца определяем из сферического треугольника на небесной сфере (рис. 3). Здесь на небесной сфере Z — точка зенита, P —

точка полюса, S — положение Солнца на небесной сфере в точке вылета птицы. Из треугольника PZS находим

$$\cos h_{\odot 2} \sin A_{\odot 2} = \cos \delta_{\odot} \sin t_{\odot 2}, \quad (20)$$

$$\cos h_{\odot 2} \cos A_{\odot 2} = -\cos \varphi_2 \sin \delta_{\odot} + \sin \varphi_2 \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot 2},$$

$$\sin h_{\odot 2} = \sin \varphi_2 \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi_2 \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot 2}, \quad (21)$$

$$\operatorname{ctg} A_{\odot 2} = \sin \varphi_2 \operatorname{ctg} t_{\odot 2} - \frac{\cos \varphi_2 \operatorname{tg} \delta_{\odot}}{\sin t_{\odot 2}}, \quad (22)$$

где $h_{\odot 2}$ — высота Солнца над горизонтом в точке вылета, δ_{\odot} — склонение Солнца (будем считать его постоянным в течение суток, т. к. склонение Солнца меняется мало), $t_{\odot 2}$ — часовой угол Солнца в том же пункте.

Из (19) и (22) находим направление к дому:

$$\operatorname{ctg}(A - A_{\odot 2}) = \frac{\left(\sin \varphi_2 \operatorname{ctg} \Delta\lambda - \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cos \varphi_2}{\sin \Delta\lambda} \right) \left(\sin \varphi_2 \operatorname{ctg} t_{\odot 2} - \frac{\cos \varphi_2 \operatorname{tg} \delta_{\odot}}{\sin t_{\odot 2}} \right) + 1}{\sin \varphi_2 \operatorname{ctg} t_{\odot 2} - \frac{\cos \varphi_2 \operatorname{tg} \delta_{\odot}}{\sin t_{\odot 2}} - \sin \varphi_2 \operatorname{ctg} \Delta\lambda + \frac{\operatorname{tg} \varphi_1 \cos \varphi_2}{\sin \Delta\lambda}}. \quad (23)$$

Из этого уравнения исключим непосредственно не наблюдаемые величины φ_1 , φ_2 , $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, δ_{\odot} и выразим $\operatorname{ctg}(A - A_{\odot 2})$ через $h_{\odot 1}$, $P_{\odot 1}$, $h_{\odot 2}$, $P_{\odot 2}$ и момент ориентации t .

Необходимо предположить, что птица чувствует звездное время s , т. е. умеет определять часовой угол $t_{\odot} = s - \alpha_{\odot}$, где α_{\odot} — прямое восхождение Солнца — мало меняющаяся величина (1° в сутки).

Для нахождения угла P из (16) дифференцируем выражения, полученные из сферического треугольника. Т. к. α_{\odot} можно считать постоянной в небольшом интервале времени, дифференцируем по s

$$\cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot} = \cos A_{\odot} \cos h_{\odot} \frac{\partial A_{\odot}}{\partial s} - \sin A_{\odot} \sin h_{\odot} \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s}, \quad (24)$$

$$\cos h_{\odot} \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} = -\cos \varphi \cos \delta_{\odot} \sin t_{\odot}. \quad (25)$$

Отсюда, подставив значения

$$\sin A_{\odot} = \frac{\cos \delta_{\odot} \sin t_{\odot}}{\cos h_{\odot}}, \quad (26)$$

$$\cos A_{\odot} = \frac{\sin \varphi \sin h_{\odot} - \sin \delta_{\odot}}{\cos \varphi \cos h_{\odot}}, \quad (27)$$

находим

$$\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} = -\frac{\cos \varphi \cos \delta_{\odot} \sin t_{\odot}}{\cos h_{\odot}}, \quad (28)$$

$$\frac{\partial A_{\odot}}{\partial s} = \frac{\cos \delta_{\odot} \cos \varphi (\cos h_{\odot} \cos t_{\odot} - \cos \delta_{\odot} \sin^2 t_{\odot} \operatorname{tg} h_{\odot} \cos \varphi)}{\cos h_{\odot} (\sin \varphi \sin h_{\odot} - \sin \delta_{\odot})} \quad (29)$$

и окончательные значения P и h_{\odot} для I и II пунктов (пункт I — место вылета, пункт II — дом птицы):

$$-\operatorname{tg} P_{1,2} = -\frac{\sin t_{\odot 1,2} (\sin \varphi_{1,2} \sin h_{\odot 1,2} - \sin \delta_{\odot})}{\cos h_{\odot 1,2} (\cos t_{\odot 1,2} - \cos \delta_{\odot 1,2} \sin^2 t_{\odot 1,2} \operatorname{tg} h_{\odot 1,2} \cos \varphi_{1,2}}, \quad (30)$$

$$\sin h_{\odot 1,2} = \sin \varphi_{1,2} \sin \delta_{\odot} + \cos \varphi_{1,2} \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot 1,2}. \quad (31)$$

Уравнения (30) и (31) дают возможность исключить из (23) все ненаблюдаемые величины и найти направление к дому по известным параметрам P_1, P_2, h_1, h_2 .

Разумеется, мы далеки от утверждения, что птица пользуется для ориентации соотношениями (23), (30), (31) и производит в уме сложные вычисления. Просто она помнит высоту и позиционный угол Солнца для данного момента у себя дома. В неизвестном месте птица определяет эти величины и выбирает такой курс, чтобы уменьшить разности $P_1 - P_2$ и $h_{\odot 1} - h_{\odot 2}$.

Анализ экспериментальных данных

Эксперименты по хомингу мы проводили в районе Черноморского заповедника ($\varphi = 46^{\circ}15'$, $\lambda = 32^{\circ}$) в мае 1968 г. В эксперименте использовали ласточек городских, деревенских и береговых и скворцов обыкновенных. Птиц отлавливали, увозили на различные расстояния от гнезд и затем выпускали. Через некоторое время они возвращались домой. Расстояние от пункта выпуска до дома и время, в течение которого птицы летели домой, регистрировали, после чего определяли среднюю скорость полета птицы.

Полет птицы домой делится на два этапа: на первом этапе некоторые птицы в течение нескольких минут кружат по спирали над местом выпуска, затем летят несколько километров в направлении, близком к северному, после чего (на втором этапе) выбирают правильный курс и летят к гнезду. Часть птиц сразу (без кружения по спирали) выбирает направление на север. Таким образом, при определении средней скорости полета мы учитываем и время, которое птица тратит на выбор направления к дому; оно равно в среднем 15—20 мин. Следовательно, средняя скорость полета птицы зависит как от действительной скорости полета, так и от времени, потраченного на ориентацию. Когда скорость птицы в среднем известна и на ее пути не встречаются помехи (пища, враги, погодные условия), то полученная нами скорость в большой степени зависит от времени навигации птицы.

Обозначим время, затраченное на ориентацию, символом $t_{\text{ор}}$, скорость полета птицы — v , типичное расстояние, которое птица пролетает без остановки и без помех, — $S_{\text{непр}}$, типичное значение промежутка времени, затраченного на перерывы в полетах, — $t_{\text{зад}}$. Количественно зависимость времени возвращения $T_{\text{возвр}}$ от расстояния завоза R можно описать следующей формулой: если S_{min} — радиус области, в которой птица может мгновенно ориентироваться по предметам на местности, то при

$$R < S_{\text{min}} \quad T_{\text{возвр}} = \frac{R}{v}, \quad (32)$$

при

$$S_{\text{min}} < R < S_{\text{непр}} \\ T_{\text{возвр}} = t_{\text{ор}} + \frac{R}{v}, \quad (33)$$

при $S_{непр} < R < S_{сут}$, где $S_{сут}$ — путь, который птица способна преодолеть, не останавливаясь на ночлег,

$$T_{возвр} = t_{ор} + t_{зад} \frac{R}{S_{непр}} + \frac{R}{v}. \quad (34)$$

Если перейти от времени возвращения к средней скорости полета

$$\bar{v} = \frac{R}{T_{возвр}}, \quad (35)$$

то получим соответственно

$$\bar{v} = v \text{ при } R < S_{мин}, \quad (36)$$

$$\bar{v} = v \frac{R}{R + vt_{ор}} \quad (37)$$

при $S_{мин} < R < S_{непр}$,

$$\bar{v} = v \frac{R}{R + \frac{vt_{зад}}{S_{непр}} R + vt_{ор}} \quad (38)$$

при $S_{непр} < R < S_{сут}$.

Разумеется, все величины, входящие в формулы (32)–(38), суть величины случайные, стохастически зависящие от времени, метеорологических условий, экземпляра птицы и других факторов. Статистические свойства этих величин (функция распределения, автокорреляционная функция и др.) полностью не известны, поэтому мы не можем рассчитать статистические свойства случайных функций $T_{возвр}(R)$ и $\bar{v}(R)$.

В то же время качественная картина зависимости ясна. Ожидаемый вид

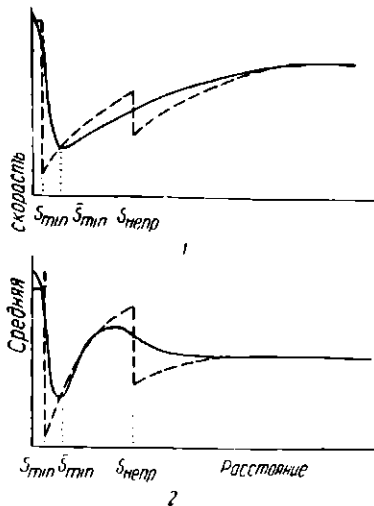


Рис. 4. Зависимость времени полета птицы от расстояния ее завоза:

1 — когда время задержек меньше времени, затраченного на ориентацию; 2 — когда время задержек больше времени, затраченного на ориентацию; $S_{мин}$ — радиус области, в которой птица ориентируется по предметам местности; $S_{тип}$ — радиус области, в которой птица ориентируется по астрономическим и др. ориентирам; $S_{непр}$ — расстояние, пролетаемое птицей без остановки и помех.

функции $\bar{v}(R)$ представлен на рис. 4. Пунктирными линиями изображена идеализированная зависимость, описываемая соотношениями (36, 37, 38). Статистический разброс приведет к сглаживанию острых углов и зигзагов кривой, и получится зависимость, изображенная сплошной линией. Отметим, что средняя скорость возвращения монотонно увеличивается с расстоянием.

В таблицах 1, 2, 3, 4 приведены статистические характеристики полетов птиц. Из табл. 1, наиболее полной, явствует, что скорость полета птицы к дому возрастает с увеличением расстояния.

Обращает на себя внимание тот факт, что когда птица выпущена на небольшом расстоянии от дома, средняя скорость ее полета к гнезду

Таблица 1
Скорость полета деревенских ласточек в различных вариантах опыта

Расстояние от дома (в км)	Количество птиц	lim (в км/час)	$\bar{v} = M[v]$ (в км/час)	$m[v]$ (в км/час)
1,0—4,9	130	0,2—30,0	6,25	1,57
5,0—9,9	87	2,0—30,0	12,45	0,76
10,0—14,9	105	2,0—46,0	13,85	0,84
15,0—19,9	130	3,0—53,3	15,55	0,76
20,0—24,9	93	3,6—44,0	19,24	0,79
25,0—29,9	60	4,0—33,3	18,70	0,75
30,0—34,9	26	8,7—30,0	19,30	1,44
35,0—39,9	53	7,0—34,4	17,93	0,84
40,0—44,9	48	6,7—45,2	23,63	1,24
45,0—49,9	6	5,0—16,8	10,40	2,30
50,0—54,9	16	5,2—15,7	10,10	0,88
55,0—59,9	21	8,0—30,0	15,09	1,37

Таблица 2
Скорость полета городских ласточек в различных вариантах опыта

Расстояние от дома (в км)	Количество птиц	lim (в км/час)	$\bar{v} = M[v]$ (в км/час)	$m[v]$ (в км/час)
1,0—4,9	19	0,9—30,0	11,28	1,48
5,0—9,9	41	0,7—24,5	7,69	0,79
10,0—14,9	28	1,9—27,0	9,20	1,10
15,0—19,9	83	2,8—37,5	12,20	0,68
20,0—24,9	—	—	—	—
25,0—29,9	3	4,1—6,0	4,90	0,56
30,0—34,9	6	6,1—11,7	8,50	0,84
35,0—39,9	3	13,4—18,2	15,4	1,43
40,0—44,9	4	6,1—8,1	7,5	0,46
45,0—49,9	3	5,6—13,0	10,4	2,41
50,0—54,9	3	6,1—6,4	6,3	0,91
55,0—59,9	—	—	—	—
60,0—64,9	1	—	8,5	—

Таблица 3
Скорость полета береговых ласточек в различных вариантах опыта

Расстояние от дома (в км)	Количество птиц	lim (в км/час)	$\bar{v} = M[v]$ (в км/час)	$m[v]$ (в км/час)
1,0—4,9	5	0,8—2,9	3,8	1,0
10,0—14,9	33	1,4—12,0	4,75	0,41
15	13	3,5—12,0	7,5	0,61
40	7	4,4—8,0	6,6	0,43

невелика, очевидно, из-за большого разброса скоростей отдельных индивидуумов. По мере увеличения расстояния от дома разброс скоростей уменьшается. Нижний предел скорости возрастает по мере удаления от дома, а верхний, можно сказать, не испытывает систематического увеличения скорости, хотя флуктуации скорости и наблюдаются. Возможно, флуктуация на расстоянии 15—20 км реальна и является

Таблица 4
Скорость полета скворцов обыкновенных в различных вариантах опыта

Расстояние от дома (в км)	Количество птиц	Ип (в км/час)	$\bar{v}=M[v]$ (в км/час)	$m[v]$ (в км/час)
1,0—4,9	15	0,5—10,5	3,58	0,9
5,0—9,9	8	0,6—8,5	4,5	0,9
10,0—14,9	4	3,6—9,7	5,5	1,64
15,0—19,9	9	4,3—12,5	9,6	0,9

следствием наиболее выгодных условий ориентации. Интереснее всего, что средняя скорость заметно уменьшается на расстоянии около 5 км.

Исходя из изложенных соображений, можно приближенно оценить время, затраченное птицей на ориентацию,—

$$t_{\text{оп}} \approx \frac{R_*}{v}, \quad (39)$$

где R_* — расстояние, на котором происходит завал скорости. Т. к. $R_* \approx 5$ км, $v \approx 20-30$ км/час, то $t_{\text{оп}} \approx 10-15$ мин. Эта оценка совпадает с результатами непосредственных наблюдений.

Для анализа экспериментальных данных мы рассчитали пространственный ход ориентационных параметров ΔP и Δh_{\odot} в зависимости от расстояния и азимута завоза. Кроме того, для фиксированного расстояния $S=15$ км рассчитан временной ход ΔP и Δh_{\odot} в течение дня. Для сравнения с гипотезой Пенникуика рассчитывалась также величина $\Delta(\partial h_{\odot}/\partial s)$. Для больших расстояний между домом и пунктом завоза расчет производили по формулам:

$$\Delta P = \arctg(\operatorname{tg} P_2) - \arctg(\operatorname{tg} P_1), \quad (40)$$

$$\Delta h_{\odot} = \arcsin(\sin h_{\odot 2}) - \arcsin(\sin h_{\odot 1}), \quad (41)$$

в которых $\operatorname{tg} P$ и $\sin h_{\odot}$ определяются соотношениями (30) и (31),

$$\Delta \left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right) = \left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right)_2 - \left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right)_1, \quad (42)$$

где $\partial h_{\odot}/\partial s$ определяется по формуле (28).

Для малых расстояний удобнее приближенные формулы (12), (13) и (16), в которые следует подставить

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\cos^2 P}{\cos h_{\odot} \frac{\partial A_{\odot}}{\partial t}} \left[\frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial t^2} - \frac{\partial h_{\odot}}{\partial t} \frac{\frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial t^2}}{\frac{\partial A_{\odot}}{\partial t}} + \operatorname{tg} h_{\odot} \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right],$$

$$\frac{\partial P}{\partial \varphi} = \frac{\cos^2 P}{\cos h_{\odot} \frac{\partial A_{\odot}}{\partial t}} \left[\frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial \varphi \partial t} - \frac{\partial h_{\odot}}{\partial t} \frac{\frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial t \partial \varphi}}{\frac{\partial A_{\odot}}{\partial t}} + \operatorname{tg} h_{\odot} \frac{\partial h_{\odot}}{\partial \varphi} \right].$$

$$\frac{\partial h_{\odot}}{\partial \varphi} = \frac{1}{\cos h_{\odot}} (\cos \varphi \cos \delta_{\odot} - \sin \varphi \cos \delta_{\odot} \cos t_{\odot}),$$

$$\frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial t^2} = \left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right) \left[\operatorname{ctg} t_{\odot} + \operatorname{tg} h_{\odot} \frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right],$$

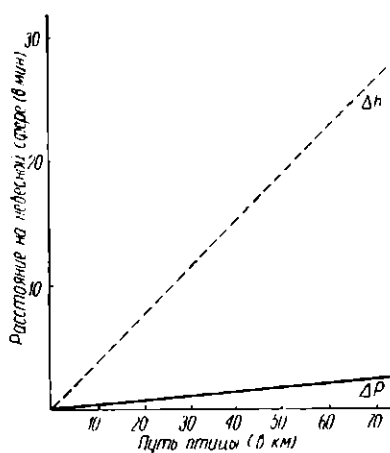
$$\frac{\partial^2 h_{\odot}}{\partial t \partial \varphi} = \left(\frac{\partial h_{\odot}}{\partial s} \right) \left[\operatorname{tg} h_{\odot} \frac{\partial h_{\odot}}{\partial \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \right],$$

$$\frac{\partial A_{\odot}}{\partial t} = \frac{\operatorname{tg} A_{\odot}}{1 + \operatorname{tg}^2 A_{\odot}} (\operatorname{ctg} t_{\odot} - \sin \varphi \operatorname{tg} A_{\odot}),$$

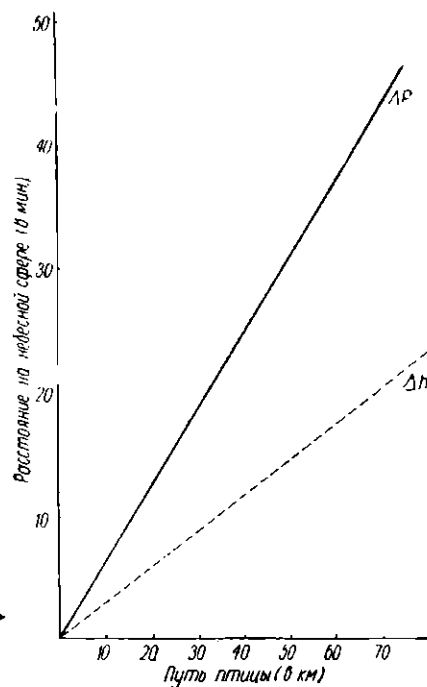
$$\frac{\partial A_{\odot}}{\partial \varphi} = \frac{\operatorname{tg}^2 A_{\odot} \sin h_{\odot}}{(1 + \operatorname{tg}^2 A_{\odot}) \sin t_{\odot} \cos \delta_{\odot}},$$

$$\frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial t^2} = \frac{\operatorname{tg} A_{\odot}}{1 + \operatorname{tg}^2 A_{\odot}} \left[\frac{\partial A_{\odot}}{\partial t} ((\operatorname{ctg} A_{\odot} - \operatorname{tg} A_{\odot}) \operatorname{ctg} t_{\odot} + 2 \sin \varphi) - \frac{1}{\sin^2 t_{\odot}} \right];$$

$$\frac{\partial^2 A_{\odot}}{\partial t \partial \varphi} = \frac{\operatorname{tg} A_{\odot}}{1 + \operatorname{tg}^2 A_{\odot}} \left[\cos \varphi \operatorname{tg} A_{\odot} + \frac{\partial A_{\odot}}{\partial \varphi} ((\operatorname{ctg} A_{\odot} - \operatorname{tg} A_{\odot}) \operatorname{ctg} t_{\odot} + 2 \sin \varphi) \right].$$



▲ Рис. 5. Зависимость изменения позиционного угла Солнца (ΔP) и высоты Солнца над горизонтом (Δh) от расстояния при движении птицы по параллели ($\Delta \varphi=0$; $\Delta \lambda=3'$).



► Рис. 6. Зависимость изменения позиционного угла Солнца (ΔP) и высоты Солнца над горизонтом (Δh) от расстояния при движении птицы по меридиану ($\Delta \varphi=3'$; $\Delta \lambda=2', 0, 12$).

Результаты расчетов приведены на графиках (рис. 5, 6, 7, 8). Как видно из графиков, разность высот Солнца при расстоянии 5,4 км составляет $1'$, т. е. примерно равна разрешающей способности глаза птицы. Так что на расстояниях ~ 5 км ориентацию затрудняет другой фактор — пороговые эффекты зрения. Разность позиционных углов при этом $\approx 3'$. Разность скоростей подъема совершенно незначительна $0''$, 6 за 1 мин. и гораздо ниже дифференциального порога чувствительности глаза.

Временной ход ориентационных параметров показывает, что наименее благоприятное время суток для навигации по позиционному углу и высоте — отрезок времени в окрестности кульминации Солнца (рис. 8). Он длится примерно два часа. Экспериментальные данные

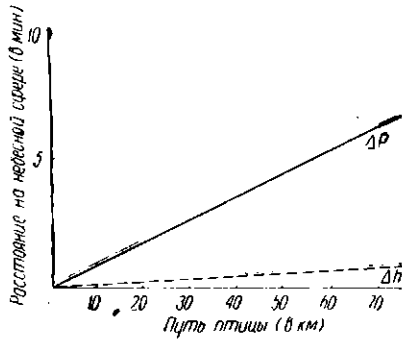


Рис. 7. Зависимость изменения позиционного угла Солнца (ΔP) и высоты Солнца над горизонтом (Δh) от расстояния при движении птицы по диагонали под углом 45° к меридиану и параллели.

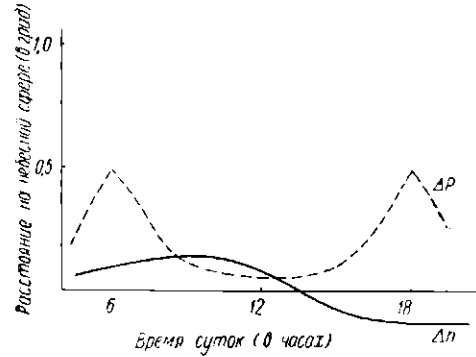


Рис. 8. Изменение позиционного угла Солнца (ΔP) и высоты Солнца над горизонтом (Δh) в течение дня.

показывают (табл. 5), что навигационные способности птиц вблизи полудня не снижаются, следовательно, они владеют каким-то дополнительным способом навигации и Солнце не является для них единственным ориентиром.

Таблица 5
Скорость возврата деревенских ласточек с расстояния 16 км в различное время дня

Время выпуска (в часах)	Количество птиц	$\bar{v}=M[v]$ (в км/час)	$m[v]$ (в км/час)	σ
7 час. 20 мин.	32	16,2	1,1	6,443
10—11	12	19,4	2,4	8,526
12—14	38	20,5	1,2	7,680
14—15	12	17,7	2,3	7,974
15—16	33	19,8	1,5	8,880
16—17	13	15,6	1,9	6,760
18—19	8	23,3	2,8	7,900

В заключение отметим, что в настоящей работе процесс ориентации рассматривается статически, т. е. предполагается, что птица выбирает направление, не изменяя своего положения. На самом деле птица выбирает правильное направление в полете. Динамическая теория ориентации и теория ориентации с учетом незрительных ориентиров должна стать предметом специальной разработки.

ЛИТЕРАТУРА

- Гриффин Д. 1966. Перелеты птиц. М.
Кратер Г. 1957. Experiments on bird orientation and their interpretation. J. Orn., v. 99. Leipzig.
Matthews G. V. T. 1953. Sun navigation in homing pigeons. J. Exp. Biol., v. 30.
Pennycuik C. J. 1960. The physical basis of astro-navigation in birds; theoretical considerations. J. Exp. Biol., v. 37.

Поступила 1.VII 1969 г.

SOLAR NAVIGATION OF BIRDS

G. K. Nazarchuk, A. B. Kistyakovsky, L. A. Smogorzhevsky, L. M. Shulman

(The Kiev Planetarium, Kiev State University, Main Astronomical Observatory, Academy of Sciences, Ukrainian SSR)

Summary

The article deals with the birds orientation as to the Sun. The variant, which is the easiest for birds to orient themselves, is chosen out of the infinite number of possible variants. This is the method to determine the direction to home from the position angle of the solar motion and the Sun height above the horizon. Determining the above-mentioned parameters and comparing them in the place of setting free and at home for the same moment of time, a bird gets necessary data to choose the right direction.

On the basis of the experimental data on homing of *Riparia riparia* L., *Hirundo rustica* L., *Delichon urbica* L. and *Sturnus vulgaris* L., it was established that the optimal conditions for birds orientation are observed not near home but at a distance of 20—40 km from it.