

В. И. ДАНИЛОВ, Г. Г. ДЕМИРЧОГЛЯН, З. А. АВЕТИСЯН,
М. А. АЛЛАХВЕРДЯН, Ш. В. ГРИГОРЯН, Г. Х. САРИБЕКЯН

ВОЗМОЖНЫЕ МЕХАНИЗМЫ МАГНИТОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПТИЦ

Проблема биологического действия магнитных полей приобретает все большее значение, особенно в связи с возможным участием этого фактора в ориентации и навигации живых организмов. Из года в год накапливаются экспериментальные данные, свидетельствующие о несомненном влиянии магнитных полей на целые организмы, отдельные живые клетки и молекулярные соединения. Недавно наблюдались достоверные изменения в условнорефлекторной деятельности птиц, размещенных в магнитном поле [5]. Однако, несмотря на наличие экспериментальных факторов, подтверждающих возможность биологического действия магнитного поля, до сих пор остаются неясными возможные пути и механизмы его влияния, поскольку еще не обнаружены чувствительные к нему рецепторы. Между тем совершенно очевидно, что жизненные процессы на Земле развивались и развиваются при наличии геомагнитного поля, которое является одним из важнейших факторов биосферы Земли. Как было впервые установлено Чижевским [6], имеет место значительное влияние солнечных циклов на процессы, происходящие в биосфере Земли.

Одно из наиболее интересных предположений о возможном участии магнитного фактора в ориентации птиц было высказано еще в 1855 г. Миддендорфом [4]. Его гипотеза состояла в том, что существующие в теле птиц,двигающихся по определенным направлениям, электрические токи как бы образуют соленоид и заставляют птицу устанавливаться определенным образом по отношению к силовым линиям внешнего магнитного поля Земли. В последующем эта гипотеза получила развитие в ряде исследований, которые привели к противоречивым результатам. В опытах Егли [14] путем прикрепления к крыльям птиц пластин создавалось добавочное магнитное переменное поле. В этом случае часть испытуемых птиц не теряла способности к ориентации. Аналогичные результаты были получены Гордоном [8], который подвешивал магнит на шею птицы. Необходимо отметить, что отрицательный результат вышеприведенных опытов еще не говорит об отсутствии влияния магнитного поля на ориентацию, поскольку у птиц могут существовать дублирующие механизмы ориентации: магнитная, солнце-компасная, астронавигация и т. д.

При постановке экспериментов по поиску механизмов влияния магнитных полей на организм птиц, на те или иные процессы в нем, например, на ориентацию, необходимо в каждом эксперименте знать зависимость магнитного поля от пространственных координат и времени, т. е. функцию вида

$$\vec{H} = \vec{H}(x, y, z, t), \quad (1)$$

которая является вектором напряженности магнитного поля, зависящим в общем случае как от пространственных координат точек x, y, z , так и времени t . Без такой характеристики эксперимент по выяснению влияния магнитного поля на те или иные процессы в организме птиц (и не только птиц) будет носить в большей степени описательный характер.

Так, например, эксперименты с укреплением на головах белых аистов и почтовых голубей намагниченных пластинок эквивалентны опытам Гордона [8], так как общим в них является зависимость магнитного поля от пространственных координат (но не времени), т. е.

$$\vec{H} = \vec{H}(x, y, z). \quad (2)$$

Опыты Гордона [8] и других авторов позволяют сделать вывод об отсутствии воздействия постоянного во времени магнитного поля на ориентацию птиц во время их полета, так как полная производная магнитного поля во времени (без перемещения намагниченных пластин относительно тела птиц) равна нулю:

$$\frac{d\vec{H}(x, y, z)}{dt} \equiv 0. \quad (3)$$

Другое дело—в экспериментах по определению дезориентации птиц в районе Курской магнитной аномалии или при исследовании поведения их при помещении в клетку с магнитным полем. Здесь уже, благодаря движению, вектор скорости перемещения $\vec{V} \neq 0$ и имеет место следующее соотношение:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{H}}{dt} = & \left(\frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial H_x}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H_x}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial H_x}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) \vec{i} + \\ & \left(\frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\partial H_y}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H_y}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial H_y}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) \vec{j} + \\ & \left(\frac{\partial H_z}{\partial t} + \frac{\partial H_z}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial H_z}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial H_z}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right) \vec{k}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ — единичные орты по осям системы координат, $\frac{d\vec{H}}{dt}$ — пол-

ная производная вектора магнитного поля по времени, $\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \left(\frac{\partial H_x}{\partial t} \vec{i} + \right.$

$+\frac{\partial H_y}{\partial t} \vec{j} + \frac{\partial H_z}{\partial t} \vec{k})$ — частная производная вектора магнитного поля $\vec{H}$

по времени, $\frac{\partial H_x}{\partial x_i}$, $\frac{\partial H_y}{\partial x_i}$, $\frac{\partial H_z}{\partial x_i}$ — частные производные магнитного поля

по пространственным координатам ($i = 1, 2, 3$, $1, 2, 3 = x, y, z$),

$\frac{\partial x}{\partial t} = v_x$, $\frac{\partial y}{\partial t} = v_y$, $\frac{\partial z}{\partial t} = v_z$ — компоненты скорости перемещения птицы относительно магнитного поля. При помещении птицы в клетку с магнитным полем, созданным источником поля геометрических размеров, сравнимых с размерами тела птицы,

$$\frac{\partial H_x}{\partial x_i} \neq 0, \frac{\partial H_y}{\partial x_i} \neq 0, \frac{\partial H_z}{\partial x_i} \neq 0, \quad (5)$$

и имеет место в соответствии с соотношением (4), $\frac{d\vec{H}}{dt} \neq 0$. Если птицы

в этих условиях проявляют беспокойство или совершают повышенное число движений, это говорит о превалирующем влиянии переменного во времени магнитного поля над постоянным. Поэтому учет зависимости магнитного поля от пространственных координат и времени является крайне существенным при постановке экспериментов по выяснению связи ориентационных способностей птиц и магнитного поля Земли.

Одна из новых гипотез была высказана Барноти [7]. В ней тело птицы рассматривается как полупроводник,двигающийся в магнитном поле Земли. Расчеты показывают, что при полетах в умеренных широтах сила индуцированного тока составит примерно 10^{-19} А. Наконец отметим высказанную недавно Токингтоном [15] идею о том, что голуби чувствуют изменяющиеся от места к месту Земли вертикальную и горизонтальную составляющие напряженности магнитного поля с помощью так называемого гребешка—органа, который находится в сетчатке глаза птиц.

Таким образом, как в ранних, так и в приведенных выше последних гипотезах, не был рассмотрен конкретный механизм биологического действия магнитного поля и не приводились прямые экспериментальные доказательства его влияния. В связи с этим необходимо рассмотреть возможные физические процессы в организме птицы во время полета в геомагнитном поле Земли.

Учитывая тот факт, что после известных экспериментов Крамера и Метьюза [8—12] роль фоторецепции в ориентации птиц не оставляет сомнений, можно предположить, что возможное участие магнитного фактора в этих явлениях должно быть в каком-то взаимодействии с зрительными стимулами. Опишем, в связи с этим, строение так называемого гребешка в глазу птиц, роль и функции которого остаются до сих пор не выясненными.

Гребешок (pecten), как известно, представляет собой сильно пигментированное, вакуолизированное образование, состоящее из ряда

Скелет док, количество, высота и площадь которых сильно варьирует у разных птиц (гребешок дневных птиц развит лучше, чем у ночных). Несмотря на ряд догадок о функциях респекта, этот вопрос продолжает оставаться неясным.

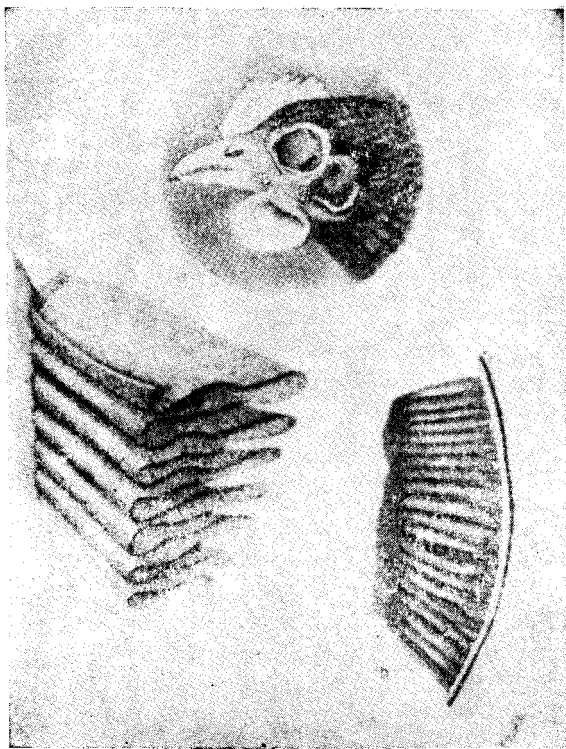


Рис. 1. Гребешок глаза курицы.

В исследованиях с периметрической стимуляцией различных областей сетчатки установлено ослабление электрических ответов (ЭРГ) при действии световых излучений на область гребешка с одновременным усилением раннего рецепторного потенциала (РРП), возникающего в момент стимуляции фоторецепторов [2]. На основании обобщения имеющихся данных по солнце-компасной ориентации птиц и проведенных исследований была сформулирована гипотеза [2] о функциональной роли гребешка, по которой он выполняет роль биологического фильтра, ослабляющего спящее и повреждающее действие фокусированного солнечного излучения на сетчатку, а также несет ряд других функций. Расположение гребешка в нижней половине сетчатки по дуге обеспечивает поглощение наиболее опасных и слепящих излучений, поступающих в эти области сетчатки сверху, когда Солнце находится в зените, это позволяет птице детектировать положение и кажущееся смещение солнечного диска и помогает соответствующим областям сетчатки в то же время различать наземные предметы на уровне достаточно высокой чувствительности. Поскольку гребешок наполнен капиллярами, его раз-

меры могут варьировать в зависимости от кровенаполнения и, следовательно, приспосабливаться к географической широте и разнице в положении Солнца на небосклоне, а также предохранять от дезадаптации различные по величине зоны сетчатки, прикрытые этим органом или его тенью. Помимо этой основной функции в регулировании уровня возбуждения и расширения диапазона функционирования сетчатки, гребешок несет, вероятно, и ряд других функций [2] как полуфункциональная система. Будучи, как это явствует из изложенных ранее опытов [2] светочувствительным, гребешок может посылать «тонические» импульсы по волокнам зрительного нерва о световом режиме, в котором находится птица и в частности об интенсивности солнечной радиации. Это обстоятельство чрезвычайно важно для вызова фото-нейро-эндокринных реакций; хорошо выраженный у птиц гребешок является тем самым первичным звеном в «энергетической» части зрительного пути [1]. Однако вряд ли только этим исчерпываются функциональные свойства гребешка.

Согласно высказанной недавно гипотезе о механизме влияния солнечной активности на сердечно-сосудистую систему человека [1], одним из основных факторов внешней среды, ответственных за это влияние, являются магнитные бури, во время которых производные магнитного поля по времени имеют большие величины, т. е. $\vec{dH}/dt \neq 0$.

Предполагаемый механизм влияния солнечной активности на организм человека сводится к нарушению электрического баланса системы крови дополнительным электрическим полем, возникающим в силу закона электромагнитной индукции в замкнутых контурах, образуемых системой артериально-венозных сосудов. Электродвижущая сила, возникающая в каком-либо замкнутом контуре, определяется как

$$\mathcal{E}ДС = \frac{\partial B}{\partial t} („WS“) \text{ контура,}$$

где «WS» — число «витков и их площадь» в том или ином биологически замкнутом контуре. Параметры «WS» подлежат экспериментальному определению.

С этой точки зрения кровеносная система гребешка птицы во время ее полета может рассматриваться как совокупность большого числа замкнутых токопроводящих витков, расположенных, по-видимому, в двух взаимоперпендикулярных плоскостях. На продольном разрезе гребня различают две сети капилляров, которые разделены глиозной опорной пластинкой. На поперечном разрезе гребня хищных птиц встречаются очень сложные сосуды. Различают две сети сосудов гребешка, одна из которых расположена у его основания. Значение их остается пока совершенно неясным. Существует мнение, что сосуды гребешка могут очень быстро увеличиваться в объеме и так же быстро опорожняться через вены. Таким образом, морфологические данные делают возможным допущение влияния переменных магнитных полей на птицу при участии богатой кровеносной сети гребешка. В этой связи уместно вспомнить и старые, оставшиеся незаконченными, опыты Н. П. Крав-

кова (1865—1924), которому удалось вплотную приблизиться к установлению факта о том, что известные колебания магнитного поля производят сосудисто-двигательное воздействие.

Рассмотрим теперь конкретно возможные процессы в гребешке глаза птиц при действии переменного во времени магнитного поля:

1. Магнитное поле, меняющееся во время полета птицы (в результате неравномерности скорости полета, изменений высоты, движений головы и т. д.) вызывает образование в кровеносных сетях гребешка дополнительной концентрации молекул гепарина. Последние, благодаря своему отрицательному электрическому заряду и химическим свойствам, вызывают состояние возбуждения центральной нервной системы.

2. Переменное магнитное поле вызывает по законам электромагнитной индукции в кровеносных кольцах гребешка появление электродвижущих сил, способных стать раздражителем как для рецепторов сосудов гребешка, так и для волокон зрительного нерва, с которыми гребешок контактирует.

3. Совместное действие магнитного поля и света на гребешок создают условия для проявления в последнем фотомагнитного эффекта. И. К. Кикоина—М. М. Носкова [3]. Переменное магнитное поле, при наличии постоянного засвета гребешка солнечным излучением, обуславливает появление магнитоконцентрационных эффектов вследствие влияния изменения напряженности поля на степень разделения носителей электрических зарядов в элементах гребешка. Все это приводит к появлению диффузионных электрических токов, могущих стать раздражителями для волокон зрительного нерва. Следовательно, гребешок рассматривается здесь как биологический фотомагнитный магнитометр.

Для экспериментального доказательства фотомагнитного эффекта в глазу птиц в лаборатории ставился ряд экспериментов.

Проводилось наблюдение над поведением темноадаптированных голубей, помещенных внутри соленоида электромагнита. Наблюдения велись в абсолютной темноте с помощью электронно-оптического преобразователя. Подсчитывалось число морганий до, во время и после выключения магнитного поля. В результате наблюдений было установлено, что при наличии магнитного поля (≈ 1000 эд) число морганий в минуту постепенно уменьшается с последующим восстановлением (рис. 2).

Электрофизиологические опыты проводились на голубях. Отводящий электрод был смонтирован в контактную линзу. Голубь укреплялся на специальной подставке с антимагнитным держателем клюва и ушей. Регистрация ЭРГ проводилась на 2-канальном чернилопишущем энцефалографе типа ЭЭЧС-1. В качестве светового раздражителя служила ксеноновая лампа с энергией вспышки 36 дж, длительностью 2,5 мсек. ЭРГ голубя регистрировалась в условиях темновой и световой адаптации, а также под действием постоянного и прерывистого магнитного поля (напряженность поля 1000 эрстед). Кончик магнитного стержня устанавливался перпендикулярно к глазу на расстоянии 0,5 см (диаметр кончика—0,5 см).

Проведенные эксперименты свидетельствуют об изменениях ЭРГ и указывают таким образом на возможность образования в глазу птиц фотомагнитного эффекта (ФМЭ) (рис. 4).

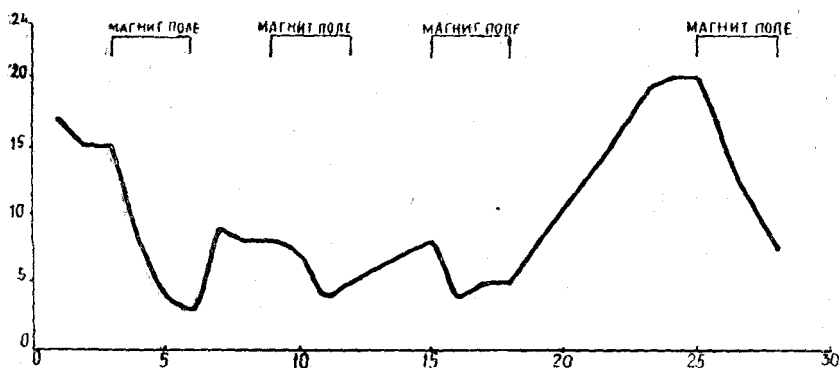


Рис. 2. Результаты опыта по изучению влияния МП на моргание голубя в темноте.

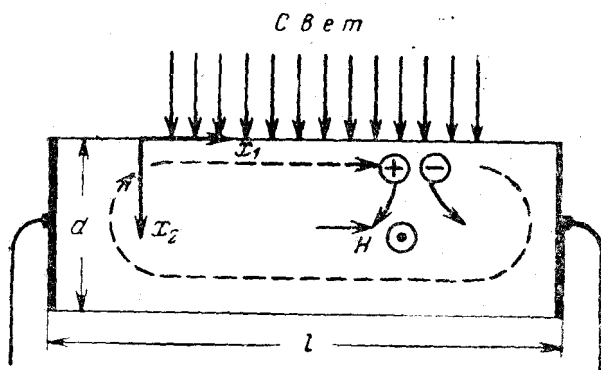


Рис. 3. Расположение полупроводникового образца, светового пучка, магнитного поля и осей координат при наблюдении ФМЭ (пунктиром показан ток, циркулирующий в условиях разомкнутой внешней цепи).

Как известно, фотомагнитный эффект относится к числу наиболее интересных фотоэлектрических явлений, поскольку с его помощью удобно и точно определяются основные параметры полупроводниковых материалов (подвижность, уровень захвата носителей, ширина запрещенной зоны и т. д.). Фотомагнитный эффект состоит в появлении фото ЭДС или фототока в освещенной полупроводниковой пластинке, помещенной в магнитное поле, параллельное ее поверхности. Фотомагнитная ЭДС наблюдается в направлении, перпендикулярном лучу света и магнитному полю (рис. 3). Помимо наблюдения фотомагнитных ЭДС за счет перераспределения в пространстве заряженных частиц-носителей тока, оказывается возможным непосредственное наблюдение и исследование изменений распределения концентраций диффундирующих неравновесных носителей в магнитном поле, получивших в литературе название магнитоконцентрационных эффектов.

Наблюдавшиеся нами изменения ЭРГ глаза голубя при включении магнитного поля можно отнести к числу магнитоконцентрационных эффектов. Происходившее увеличение вольтажа ЭРГ при включении маг-

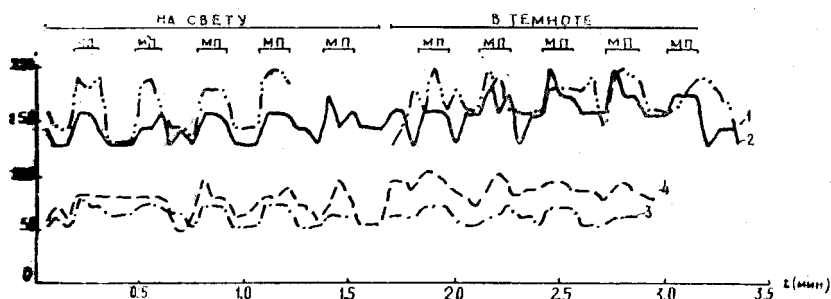


Рис. 4. Влияние магнитного поля на ЭРГ голубя.

нитного поля (таблица) свидетельствует об увеличении концентрации основных носителей в сетчатке. Поскольку сетчатка и гребешок птицы образуют единую рецепторную систему, можно допустить, что добавка к сигналу сетчатки при включении МП происходит за счет про-

Таблица
Изменение волны „в“ ЭРГ глаза голубей под влиянием магнитного поля (МП)

ЭРГ в мкВ при световой адаптации	ЭРГ в мкВ при темновой адаптации	ЭРГ в мкВ на свету при наличии МП	ЭРГ в мкВ в темноте при наличии МП
$66 \pm 11,21$	$86 \pm 9,64$	$80 \pm 7,48$	$94 \pm 6,65$
$59 \pm 4,7$	$60 \pm 4,7$	$71 \pm 4,69$	$68 \pm 4,7$
$142 \pm 9,4$	$164 \pm 15,7$	$174 \pm 10,5$	$185 \pm 15,7$
136 ± 14	150 ± 20	$155 \pm 8,8$	$170 \pm 16,5$

цессов, имеющих место в гребешке, обладающем определенной светочувствительностью. В таком случае фотоманнитные сигналы в гребешке будут зависеть (при прочих равных условиях) от величины и направления магнитного поля; следовательно, данный орган может выполнять роль биологического магнитометра. Благоприятствует этому и расположение гребешка на зрительном нерве, что дает возможность посылать фотоманнитный сигнал как дополнительный по этой же эфферентной зрительной системе голубя.

Рассмотренная гипотеза о полуфункциональной роли гребешка требует дальнейшего экспериментального и теоретического подтверждения.

Лаборатория зрительной рецепции
АН АрмССР

Поступило 31.III 1970 г.

Վ. Ի. ԳԱՆԻՈՎ, Հ. Գ. ԴԵՄԻՐՉՈԳԼՅԱՆ, Զ. Ա. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Մ. Ա. ԱՆՀԱԵՐԳՅԱՆ,
Շ. Վ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Գ. Խ. ՍԱՐԻՔԵԿՅԱՆ

ԹՈՉՈՒՆԻ ՄԱԴՆԻՍԱԶԳԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՀՆԱՐԱՎՈՐ ՄԵԽԱՆԻԶՄՆԵՐԸ

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Էլեկտրաֆիզիոլոգիական փորձերով գրանցվել է աղավնու էլեկտրառեա-
կոգրամման լուսային ու մթնային հարմարման պայմաններում, հաստատուն
և փոփոխական մագնիսական դաշտերի ազդեցության տակ:

Փորձերը ցույց են տալիս աչքում ֆոտոմագնիսական էֆեկտի առաջացման
հնարավորությունը, մագնիսական դաշտի ազդեցության ներքո առաջանում է
էլեկտրառեալոգրամմայի ալիքի մեծացում:

Էլեկտրոնա-օպտիկական վերափոխիչի օգնությամբ ուսումնասիրվել է նաև
թռչունի վարքային փոփոխությունը մագնիսական դաշտում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Данилов В. И., Демирчоглян Г. Г., Нагапетян Х. О., Григорян Ш. В. Материалы II Всесоюзного совещания по изучению влияния магнитных полей на биологические объекты 24—26 сентября, М., 1969.
2. Демирчоглян Г. Г., Мирзоян В. С., Аллахвердян М. А., Нагапетян Х. О., Тер-Газарянц Е. Т., Саакян М. В. Симпозиум ИФАК (тезисы докладов), Ереван, 1968.
3. Кикоин И. К., Носков М. М. Sow. Phys., 5, 1934.
4. Миддендорф, 1885. Цитировано по Гриффину. Перелеты птиц, М., 1966.
5. Холодов Ю. А. Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему, М., 1966.
6. Чижевский А. Л. Солнце и мы, М., 1963.
7. Barnothy J. J. Biolog. Effects of magnetic fields, Plenum press, v. 1, 1964.
8. Gordon D. Science, 108, 710, 1948.
9. Kramer G., Pratt J. C., St. Paul, U. von. Science, 123, 328, 1956.
10. Kramer G. Ibis, 99, 196, 1957.
11. Kramer G. Ibis, 102, 26, 1959.
12. Matthews G. V. T. J. Exp. Biol., 30, 243, 1953.
13. Matthews G. V. T. Bird Navigation, Cambridge University Press, 1955.
14. Yeagley H. J. Appl. Phys, 18, 1035, 1947.
15. Tockington L. Electronic design, 13, 2, 4, 1965.