CZU: 550.383:573.22 **https://doi.org/10.59295/sum1(181)2025_09**

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

Ирина КОЛОМИЕЦ,
Государственный университет Молдовы

Выполнен обзор по влиянию земного магнетизма на биологические системы. Обзор включает сведения о физической природе магнетизма, а также о характеристиках магнитного поля Земли, порождающих его геологических процессах и физических явлениях на внешней границе магнитосферы. Рассмотрено проявление магнетизма на химическом уровне с учетом физической природы диа-, пара- и ферромагнетизма. Соответствующая классификация химических элементов сопровождается сведениями об их биологической функции. Рассмотрены классы соединений, входящих в состав живых систем и потенциально способных к взаимодействию с магнитосферой, и обосновывается особая роль в этом координационных соединений. Рассмотрены особенности взаимодействия входящих в состав живых систем диа-, пара- и ферромагнетиков с магнитным полем, причем особое внимание уделено рассмотрению основных фактов и гипотез, касающихся механизмов магниторецепции.

Ключевые слова*: магнитное поле, магнито-, электромагнито-, фоторецепция, парамагнетики, диамагнетики, ферромагнетики, координационные соединения, фотон, биологические системы.*

INFLUENCE OF THE GEOMAGNETIC FIELD ON LIVING ORGANISMS

The influence of terrestrial magnetism on biological systems is reviewed. The review is preceded by information on the physical nature of magnetism, as well as on the characteristics of the Earth's magnetic field, the geological processes that generate it, and physical phenomena at the outer boundary of the magnetosphere. The manifestation of magnetism at the chemical level and the physical nature of dia-, para-, and ferromagnetism are considered. The corresponding classification of chemical elements is accompanied by information on their biological function. The classes of compounds that are part of living systems and are potentially capable of interacting with the magnetosphere are considered, and the special role of coordination compounds is substantiated. The features of the interaction of dia-, para-, and ferromagnets that are part of living systems with a magnetic field are considered, with special attention paid to the main facts and hypotheses concerning the mechanisms of magnetoreception.

Keywords: *magnetic field, magnetic-, electromagnetic-, photoreception, paramagnets, diamagnets, ferromagnets, coordination compounds, photon, biological systems.*

Введение

Напряжённость земного магнитного поля за последние 22 года уменьшилась в среднем на 1,7 %, а в некоторых регионах, – например в южной части Атлантического океана, – на 10 %. Как показали данные передаваемые спутниками Swarm, запущенными Европейским космическим агентством (European Space Agency, ESA), наибольший уровень снижения геомагнитного поля наблюдается в Западном полушарии. Резкое падение напряженности магнитного поля Земли в перспективе может привести к инверсии южного и северного магнитных полюсов. [1]. И хотя по данным палеонтологии [2], массовых вымираний было значительно меньше чем инверсий и не всегда инверсия полюсов была причиной вымирания, падение напряженности магнитного поля создает значительные риски для жизнедеятельности растений, животных и людей [3]. В связи с этим, особую актуальность приобретают исследования влияния электромагнитных полей на животные и растительные организмы. Цель данной работы сводилась к инвентаризации и анализу литературных данных, как по природе магнитного поля, так и по механизмам его взаимодействия с биологическими системами.

2. Методы и объекты исследования

В ходе метаанализа применяли метод последовательных паттернов (SP – sequence pattern), заключающийся в обнаружении закономерностей или серии событий, происходящих в определенной

последовательности [4]. Методологической основой исследований был системный подход [5]. В качестве объекта исследования рассматривались биологические системы на всех уровнях организации – от глобальном до квантового. Визуализация результатов осуществлялась при помощи пакета программ Excel.

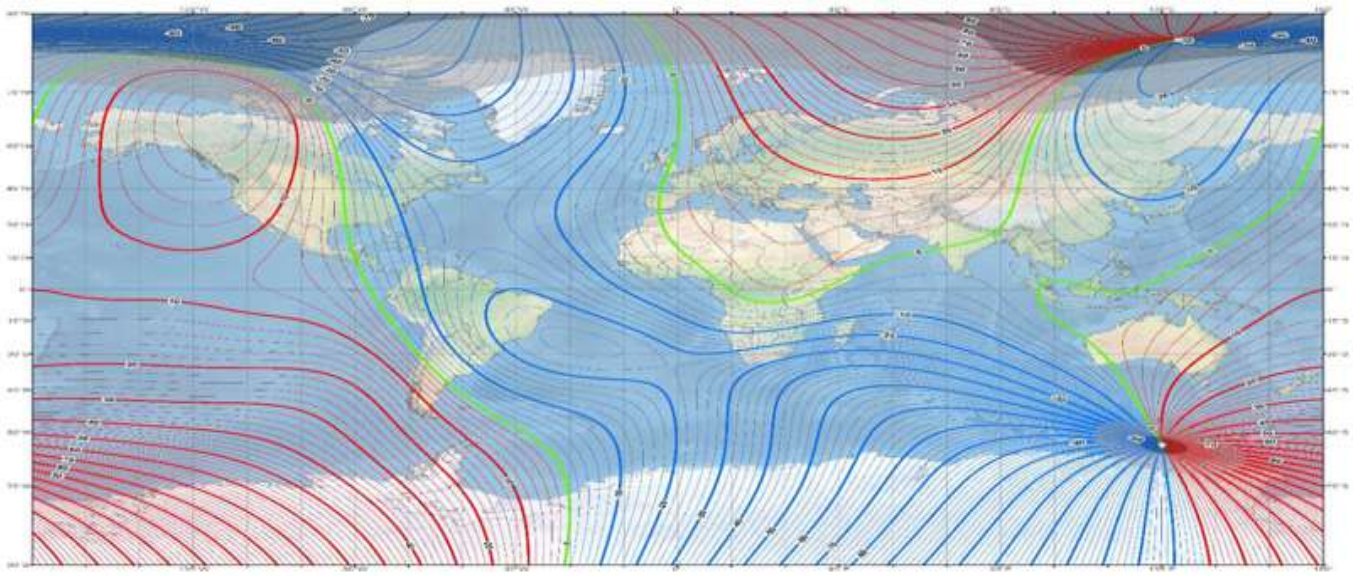
3. Результаты и обсуждение

3.1. Природа внешнего магнитного поля Земли.

Хотя современный уровень развития науки значительно расширяет базу эмпирических данных о взаимодействии электромагнитных полей с биологическими системами, но нет полной ясности в вопросах природы таких взаимодействий. Каким образом волна распространяется в вакууме, если вакуум – пространство, свободное от вещества? Основываясь на элементарной логике, описать электромагнитное излучение как волну невозможно без понятия смещения (электродинамика Максвелла), но понятие смещения невозможно без понятия материальной точки – корпускулы (Механика Ньютона) [6]. Возможно, квантовая механика, описывающая вакуумное пространство как «непустое в чрезвычайно малых масштабах», практически, приближая структурную частицу к абстрактному понятию материальной точки, способна ответить на поставленные вопросы, а введение Полем Дираком понятия «квантового вакуума» вполне оправдано [7]. Тем более, что сам Эйнштейн утверждал, что, согласно общей теории относительности, пространство без эфира (= квантового вакуума) немыслимо; в таком пространстве не только бы не было никакого распространения света, но и не могли бы существовать никакие стандарты пространства и времени [8]. По словам лауреата Нобелевской премии по физике Роберта Б. Лафлина: «Теория относительности на самом деле ничего не говорит о существовании или несуществовании материи, пронизывающей вселенную. Но мы не говорим об этом, потому что это табу» [9]. Согласно модели Штёрмера [10], с поверхностных слоев Солнца в космическое пространство уносится огромное количество частиц солнечной материи, которые несут на себе положительные и отрицательные заряды. В процессе неравномерного радиоактивного излучения на поверхности Солнца превалирует, то положительный, то отрицательный заряд. В случае заряда положительного знака, Солнце распространяет кулоновскую силу на электроны, блуждающие в гелиосфере. Как только заряд поверхности Солнца меняется на отрицательный – кулоновская сила притягивает положительно заряженные частицы. Благодаря такому переменному току, устанавливается стационарное состояние, при котором Солнце обеспечивает весьма продолжительное истечение заряженных частиц и одновременно получает их из окружающего пространства в равновеликом количестве. Такие колебания солнечных токов экранируют на магнитосфере Земли токи противоположного знака, обуславливающие циклические изменение самого внешнего магнитного поля Земли. Переносчиком магнитного поля, согласно теории квантовой электродинамики, является самая распространенная во Вселенной частица – фотон. Это безмассовая частица, способная существовать, только двигаясь со скоростью света. Электрический заряд фотона равен нулю. Однако наличие поляризации – ориентации их электромагнитного поля – дает возможность «намагнитить луч света (эффект Фарадея, открытый в 1845 году) и осветить магнитную силовую линию (обратный эффект Фарадея, открытый Питаевским Л. П в 1960 году)» [11]. С квантово-механической точки зрения, понятие поляризации света связано с наличием у фотона спина. Фотоны могут находиться в двух состояниях со значениями момента импульса $\pm\hbar$ ($\hbar$ – постоянная Планка), направленного вдоль импульса фотона. Такие фотоны обладают круговой поляризацией: левой, когда квантовое число $m = +1$, или правой, когда $m = -1$, энергия (частота) таких фотонов одинакова. В магнитном поле компоненты с $m = \pm 1$ будут распространяться с разными фазовыми скоростями: $v_{f\pm}=c / n(1\pm Q)$, где c – скорость света, n – показатель преломления среды, а Q – специальный магнитооптический параметр. В немагнитных средах параметр Q пропорционален магнитному полю и в не очень больших полях (магнитная индукция не превышает 200–300 мТл) имеет типичное значение порядка 10^{-6}–10^{-4}. В ферромагнитных материалах этот параметр отличен от нуля даже в отсутствие поля и достигает величин 10^{-3}–10^{-1}. Он определяется внутренним магнитным полем, которое создается атомами и ионами кристаллической решетки магнетика.

3.2. Природа основного магнитного поля

К магнетикам относятся материалы, вступающие во взаимодействие с магнитным полем, выражающемся в его изменении, а также в других физических явлениях – изменении физических размеров, температуры, проводимости, электрического потенциала и т. д. В этом смысле к магнетикам относятся практически все вещества (поскольку ни у какого из них магнитная восприимчивость не равна нулю), большинство из них относится к классам диамагнетиков (имеющих небольшую отрицательную магнитную восприимчивость – и несколько ослабляющих магнитное поле) или парамагнетиков (имеющих небольшую положительную магнитную восприимчивость – и несколько усиливающих магнитное поле). Попадая во внешнее магнитное поле, соединения, содержащие диамагнетики, выталкиваются из него, а вещества содержащие парамагнетики – втягиваются. Более редко среди магнетиков встречаются ферромагнетики (намного усиливающие внешнее магнитное поле, имеющие большую положительную магнитную восприимчивость, способные спонтанно намагничиваться и втягиваться магнитным полем). К ферромагнетикам относятся: железо (Fe), кобальт (Co), никель (Ni), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho) и эрбий (Er), а также многочисленные металлические сплавы и соединения упомянутых металлов. Находясь в жидком внешнем ядре Земли при температуре порядка 4—6 тысяч градусов Кельвина, ферромагнетики (в основном железо) создают под действием силы Кориолиса спиралевидные конвективные потоки тепла – столбы Тейлора. Благодаря трению слоёв они приобретают электрический заряд, формируя контурные токи. Такие токи и создают основное магнитное поле Земли.



Карта 1. Изогоны магнитного поля Земли на 2025 год [12]

Математически этот процесс описывается магнитогидродинамическим уравнением индукции:

$\partial B / \partial t = \nabla \times (u \times B) + \eta \nabla^2 B,$

где u — скорость потока жидкости, B — магнитная индукция, $\eta = 1/\mu\sigma$ — магнитная вязкость (коэффициент магнитной диффузии), σ — электропроводность жидкости, а μ — магнитная проницаемость. Первое слагаемое в правой части соответствует формированию магнитного поля, а второе — его подавлению [10].

В силу эволюционных процессов, происходящих в мантии и земной коре, распределение химических элементов, в том числе и ферромагнетиков, неравномерно (таблица 1). Такая неравномерность распределения на земной поверхности ферромагнетиков создает аномальные магнитные зоны. В некоторых районах магнитных аномалий напряжённость резко возрастает, достигая порядка 2Э по сравнению со средней напряженностью 0,5 Э (0,34Э на экваторе и 0,66Э на магнитных полюсах).

Таблица 1. Кларки магнетиков в земной коре [13]

Элемент	С, мг/кг	Элемент	С, мг/кг	Элемент	С, мг/кг	Элемент	С, мг/кг
Кислород, O	470000	Цинк, Zn	83	Тербий, Tb	4,3	Тулий, Tm	0,27
Кремний, Si	295000	Церий, Ce	70	Бериллий, Be	3,8	Индий, In	0,25
Алюминий, Al	80500	Никель, Ni	58	Цезий, Cs	3,7	Кадмий, Cd	0,13
Железо, Fe	46500	Медь, Cu	47	Эрбий, Er	3,3	Ртуть, Hg	0,083
Кальций, Ca	29600	Неодим, Nd	37	Олово, Sn	2,5	Серебро, Ag	0,07
Натрий, Na	25000	Литий, Li	32	Тантал, Ta	2,5	Фтор, F	0,06
Калий, K	25000	Иттрий, Y	29	Уран, U	2,5	Селен, Se	0,05
Магний, Mg	18700	Лантан, La	29	Бром, Br	2,1	Палладий, Pd	0,013
Титан, Ti	4500	Ниобий, Nb	20	Гольмий, Ho	1,7	Висмут, Bi	0,009
Марганец, Mn	1000	Галлий, Ga	19	Мышьяк, As	1,7	Золото, Au	0,0043
Фосфор, P	930	Азот, N	19	Германий, Ge	1,4	Рений, Re	0,0007
Барий, Ba	650	Кобальт, Co	18	Вольфрам, W	1,3	Теллур, Te	0
Сера, S	470	Свинец, Pb	16	Европий, Eu	1,3	Платина,Pt	0
Стронций, Sr	340	Торий, Th	13	Молибден, Mo	1,1	Рутений,Ru	0
Хром,Cr	330	Бор, B	12	Гафний, Hf	1	Родий,Rh	0
Углерод, C	230	Скандий, Sc	10	Таллий, Tl	1	Осмий,Os	0
Хлор, Cl	170	Празеодим, Pr	9	Лютеций, Lu	0,8	Прометий, Pm	0
Цирконий, Zr	170	Гадолиний, Gd	8	Сурьма, Sb	0,5		
Рубидий, Rb	150	Самарий, Sm	8	Иод, I	0,4		
Ванадий ,V	90	Диспрозий, Dy	5	Иттербий, Yb	0,33		

ферромагнетик	парамагнетик	диамагнетик

Высокая магнитная проницаемость ферромагнетиков делает их идеальным материалом для магниторецепции. Зачастую они входят в состав координационных соединений как органической, так и неорганической природы в качестве комплексообразователя. Лигандами могут выступать молекулы H_2O, CO, NH_3, анионы OH^-, Cl^-, PO_4^{3-}, а также катион водорода H^+. Механизмы избирательного взаимодействия фотона и вещества описываются теорией кристаллического поля [14]. Из-за расщепления энергии d-орбиталей под действием поглощаемых квантов света появляется возможность перехода электронов с подуровней d_{xy}, d_{zy}, d_{xz} на вакантные подуровни с более высокой энергией d_z^2,$d_z^2d_{-y}^2$. Такие переходы сопровождаются изменением окраски комплексного соединения. Если комплексообразователь имеет электронную конфигурацию d^0 или d^{10}, то переходы электронов с d_{xy}, d_{zy}, d_{xz} подуровней на d_z^2,$d_z^2d_{-y}^2$ или наоборот невозможны либо из-за отсутствия электронов, либо из-за отсутствия вакантных орбиталей. Поэтому растворы комплексов с такими комплексообразователями не поглощают фотонов из видимой части спектра и выглядят бесцветными. В зависимости от разности энергий расщепленных уровней комплексы поглощают кванты света определённых диапазонов длин волн, поэтому имеют соответствующую окраску. Таким образом координационная химия объясняет закон Гротгуса – Дрепера (1818-1843) - фотоны, определенного диапазона избирательно взаимодействует только с веществом, диапазон отражения которого комплементарен диапазону длин волн падающих квантов [15].

Типичными представителями координационных соединений являются хелатные формы удобрений, витамины, пигменты (хлорофилл, гемоглобин, антоциан) и другие комплексные соединения. Являясь магнетиками, они обуславливают множество биологических явлений (таблица 2). Магнитная рецепция биологических систем осуществляется посредством диа-, пара- и ферромагнетиков, входящих в состав координационных соединений и участвующих в жизненоважных химических процессах – росте, метаболизме, размножении и старении. Течение этих процессов, как и возможность ими управлять обусловлены основными свойствами ферромагнетиков: спонтанно намагничиваться, притягиваться магнитным полем, сохранять «память» предыдущих состояний (петля гистерезиса).

Таблица 2. Роль магнетиков в функционировании живых организмов

Магнетик	Соединение	Функция
Кальций, Ca	Гидроксиапатит карбоната кальция	Основной элемент костной ткани, а также основной универсальный регулятор жизнедеятельности клеток (секреция гормонов и нейромедиаторов, гемокоагуляция)
Магний, Mg	Креатинфосфат, хлорофилл	Замещает двухвалентное железо после его глобального окисления до трёхвалентного в процессе фотосинтеза, является кофактором многих ферментативных реакций.
Натрий, Na	Na^+/K^+ *аденозинтрифосфатаза*	Мембранный потенциал и мышечные сокращения, поддержание осмотической концентрации крови, кислотно-щелочного баланса, водного баланса, мембранного транспорта, активация многих энзимов.
Калий, K	Na^+/K^+ *аденозинтрифосфатаза*	Смотреть Na.
Фосфор, P	Орто- и пирофосфорная кислота, гидроксилапатит. Входит в состав нуклеотидов, нуклеиновых кислот, фосфопротеидов, фосфолипидов, коферментов, ферментов.	Энергетический обмен, синтез костной ткани, метаболизм.
Хлор, Cl	NaCl	Участвуют в поддержании осмотического равновесия, нейрорегуляция, протеолитическая активность ферментов желудочного сока, участвуют в поддержании pH клеток.
Сера, S	Входит в состав некоторых аминокислот (цистеин, метионин), витаминов (биотин, тиамин), ферментов.	Участвует в образовании третичной структуры белка (формирование дисульфидных мостиков) и в бактериальном фотосинтезе (сера входит в состав бактериохлорофилла, является источником энергии в хемосинтезе
Железо, Fe	Гемоглобин, миоглобин цитохромы (в том числе и цитохром P-450), пероксидазы, каталазы.	Фотосинтез, транспорт кислорода крови
Кобальт, Co	Входит в состав витамина B_{12} (кобаламин)	Задействован при кроветворении, функциях нервной системы и печени, ферментативных реакциях.
Медь, Cu	Входит в состав белка церулоплазмина, цитохром-с-оксидазы, пероксид дисмутазы, гемоцианина в виде имидазольного комплекса иона меди.	Влияет на активность белкового обмена, на рост костной ткани.

Ванадий, V	В организме человека присутствует в виде катиона ванадила (IV) VO^{2+} и аниона ванадата (V) $(H^2VO)^{4-}$.	Тормозит синтез жирных кислот, подавляет образование холестерина, ингибирует ряд ферментных систем, тормозит фосфорилирование и синтез АТФ, снижает уровень коферментов А и Q, стимулирует активность моноаминоксидазы и окислительное фосфорилирование.
Хром, Cr	Входит в состав фермента трипсина.	Принимает участие в проведении нервных импульсов, липидном обмене. Предотвращает развитие атеросклероза, улучшает ранозаживление, деятельность миокарда и работу половой системы.
Марганец, Mn	В виде ионов Mn^{2+} или его комплексных соединений с белками, нуклеиновыми кислотами и аминокислотами входят в состав металлоферментов - аргиназы, холинэстеразы, пируваткарбоксилазы и др.	Участвует в синтезе белков, молекул АТФ, в образовании костной ткани и регуляции клеточного метаболизма. выступает в роли кофактора супероксиддисмутазы.
Молибден, Mo	Входит в состав ряда ферментов: альдегидоксидаза, сульфитоксидаза, ксантиноксидаза и др.	Регулирует процессы обмена веществ, способствует задержанию в организме фтора, участвует в стимуляции деятельности ферментов, отвечающих за дыхание тканей и синтез аскорбиновой кислоты.
Селен, Se	Входит в состав активных центров некоторых белков в форме аминокислоты.	Взаимодействует с витаминами, ферментами и биологическими мембранами, регулирует обмен жиров, белков и углеводов, участвует в окислительно-восстановительных процессах, является составным компонентом более 30 жизненно важных биологически активных соединений организма.
Йод, I	Входит в скелетный белок губок и скелетопротеинов морских многощетинковых червей в состав тиреоидных гормонов тироксина и трийодтиронина.	Воздействует на рост, развитие и обмен веществ организма.
Цинк, Zn	Входит в состав более 400 ферментов. Среди них ферменты, катализирующие гидролиз пептидов, белков и сложных эфиров, образование альдегидов, полимеризацию ДНК и РНК.	Содержится в эритроцитах крови и способствует превращению углекислого газа, образующегося в тканях в процессе их жизнедеятельности, в гидрокарбонат-ионы и угольную кислоту, которая кровью переносится в лёгкие, где выводится из организма в виде углекислого газа. Участвует в выработке спермы и мужских гормонов, в метаболизме витамина Е, участвует в синтезе анаболических гормонов: инсулина, тестостерона и гормона роста, алкогольдегидрогеназы.
Фтор, F	Содержится в эмали зубов в составе фторапатита — $Ca_5F(PO_4)_3$ — в костях.	Участвует в синтезе костной ткани.
Кремний, Si	Содержатся в хвощах, злаках, культурном рисе, ответственен за связывание диатомового кремнезёма у ракообразных.	Входит в состав опорных образований у растений и скелетных — у животных. концентрируется в морских организмах — диатомовых водорослях, радиоляриях, губках.

Бром, Br	Содержится в виде остатков ортокремниевой кислоты в соединительной ткани, входит в состав гликозаминогликанов и их белковых комплексов, коллагена, которые формируют и стабилизируют каркас соединительной ткани.	Способствует удалению токсинов, повышает прочность и эластичность стенок сосудов, увеличивает прочность костной ткани, усиливает защитные силы организма от инфекций, предотвращает преждевременное старение. Снимает раздражения и воспаления кожи, укрепляет ногти и волосы, влияет на фертильность.
Бор, B	Входит в состав б**орной кислоты, бората натрия и оксида бора.**	Улучшает жизнедеятельность растений. Влияет на окислительные и энергетические процессы в тканях, на биосинтез необходимых веществ. Роль бора в животном организме не выяснена. Один из редких типов дистрофии роговицы связан с геном, кодирующим белок-транспортёр, предположительно регулирующий внутриклеточную концентрацию бора.

ферромагнетик	парамагнетик	диамагнетик

3.3. Магниторецепция живых организмов

Механизм магниторецепции до конца неясен. Существует несколько гипотез механизма магниторецепции. Первая гипотеза строится вокруг соединений, содержащих магнетик типа $FeO{\cdot}Fe_3O_4$ (оксид железа II и III, магнетит) или его аналогов. В магнитном поле магнетит ведет себя как стрелка компаса, подвергая структурным перестройкам мембранный белок, и влияя таким образом на мембранный потенциал. Что, в свою очередь, может влиять на биохимические реакции внутри рецепторной клетки. Есть предположения, что комплекс Fe^{+2}, который входит в состав гемоглобина крови чело века($C_{3032}H_{4816}O_{872}N_{796}S_8Fe_4$) может рассматриваться в качестве магниторецептора. Было обнаружено, что кровь ведет себя как диамагнитная жидкость, когда она обогащена кислородом (в артериях) и как парамагнитный материал, когда она обескислорожена (в венах) [16]. Следовательно, венозная кровь «втягивается» внешним магнитным полем, а артериальная «выталкивается». Опыты по исследованию ориентации нормальных эритроцитов крови в сильном постоянном магнитном поле с максимальной величиной до 8 Тесла показали, что эритроциты крови ориентируются таким образом, чтобы плоскость их диска была параллельна направлению приложенного поля [17]. Но магнитное поле Земли (на широте 50°составляет $5{\cdot}10^{-5}$ Тл, на экваторе — $3{,}1{\cdot}10^{-5}$ Тл, в солнечных пятнах — 0,3 Тл) значительно меньше экспериментального (8 Тл) при котором можно наблюдать парамагнитный эффект в эритроцитах. По этой причине воздействие слабых магнитных полей на биообъекты долгое время вызывало сомнение. По некоторым данным [18], амплитуды естественных электромагнитных полей соответствуют электромагнитным шумам в самих клетках живых организмов.

Вторая гипотеза магниторецепции предполагает существование совместной электро- и магниторецепции. Согласно данной гипотезе, магнитные поля могут детектироваться в специализированных вспомогательных структурах, которые преобразуют магнитное поле в электромагнитное. Например, у некоторых видов рыб ориентация в магнитном поле осуществляется опосредовано, через электрорецепторы – *ампулы Лоренцини,* способные обнаруживать потоки постоянного тока. Детальное изучение ампул Лоренцини показало, что заполняющее их вещество обладает ферромагнитными свойствами [19]. Функцию аналогичную *ампулам Лоренцини* выполняют кутикулосомы в волосковых клетках птиц, которые состоят из наночастиц ферритина (*железопротеида,* одна молекула которого включает до 4000 атомов железа), который содержится во всех органах и тканях [20]. Эта структура молекулярно связана с везикулярным дыханием, что позволяет предположить, что она может регулировать концентрацию железа во внутренних отделах уха, и быть задействована в магниторецепции. По сушеству эту гипотезу можно разсматривать как разновидность первой, так как в обеих гипотезах за рецепцию отвечает ферромагнетик.

Третья гипотеза базируется на существовании молекулярных структур одновременно отвечающих за фото – и магниторецепцию. Теоретически молекулярными свойствами для функционирования в качестве фото- и магниторецепторов обладали криптохромы – зрительные пигменты. Поглощая квант света коротковолнового диапазона, они образуют пару радикалов. Спины неспаренных электронов радикалов могут иметь паралельную или антипаралельную ориентацию. Попадая во внешнее магнитное поле, паралельно ориентированные спины ведут себя как парамагнетики, т.е. усиливают внешнее магнитное поле. При антипаралельной ориентации спинов, криптохромы ведут себя как диамагнетики т.е. ослабляют внешнее магнитное поле. Однако не ясным был вопрос дифференциации магнито – и фотосигналов. Ситуация оставалась запутанной, пока китайские ученые из Пекинского университета [21] не обнаружили ген белка-посредника, который связывал криптохром и железо в единый механизм магниторецепции. Белок-продукт этого гена (CG8198) получил новое название MagR (от Magnetic Receptor, «магнитный рецептор»), вместе с криптохромом белок формирует устойчивые комплексы, включающие «стержень» из 20 молекул MagR, окруженных спиралью, которая сложена 10 молекулами криптохрома. Такие структуры не только похожи на вытянутые стрелки компаса, но в опытах in vitro также ориентируются вдоль линий магнитного поля. Однако в начале 2019 года результаты такого изящного эксперимента были поставлены под сомнение. Группа ученых [22] изучала серии срезов внутреннего уха голубей с помощью рентгеновской флуоресцентной микроскопии и трансмиссионной (просвечивающей) электронной микроскопии. Скоплений кристаллов ферромагнетита не выявили ни в рецепторах лагены, ни в межклеточном пространстве. Подобный результат был получен с применением масс-спектрометрии и другими учеными [23]. Таким образом вопрос совместной фото- и магниторецепции остался открытым. Что касается роли криптохромов в растениях, то было установлено, что они также, как и в животных организмах, играют ключевую роль в регуляции циркадных ритмов растений, в том числе и фототропизма [24].

В процессе поиска механизмов магниторецепции не была оставлена без внимания и общая модель баро- и магниторецепции. Согласно которой [25] магниторецепция в биологических системах происходит за счет образования в коллоидах, находящихся в водной среде, осадка тиоловых соединений (RSH, где R — углеводородный радикал), с которыми связаны такие биологические процессы, как клеточное деление, проницаемость клеточных мембран, активность ферментов, функций рецепторов, структура белка и липопротеиновых комплексов, синтез белков, свертываемость крови, старение организма и др.

Еще одной из наиболее обсуждаемых в настоящее время гипотез является теория, объясняющая влияние магнитного поля на объекты, содержащие связанные ионы (прежде всего Ca^{2+}), регулирующие скорость ключевых для клетки кальцийзависимых биохимических реакций. Эта модель получила известность как теория магнитного параметрического резонанса или «кальмодулиновая» гипотеза [26]. По мнению A. R. Liboff [27], магнитное поле (сила Лоренца) вызывает отклонение траектории движения ионов K+, Mg^{2}+, Ca^{2}+ через ионные каналы мембраны. На причастность Ca^{2+} к механизмам магниторецепции указывает и «кальцийгидратационная» теория первичных физикохимических реакций биосистем на воздействия магнитных полей [28]. В этих реакциях свободные ионы кальция выполняют роль посредника между жидкой средой организма и магнитным полем, а частота обмена ионов Ca^{2+} в клетках находится в интервале частот внешнего магнитного поля. Во многих случаях частоты магнитного поля совпадали с собственными ритмами функционирования биологической системы. Такое понимание природы взаимодействия биологических систем и внешнего электромагнитного поля солнечного излучения, как резонансного взаимодействия частот объясняет с физической точки зрения закон Гротгуса – Дрепера (1818-1843) – фотоны, определенного диапазона избирательно взаимодействует только с веществом, диапазон отражения которого комплементарен диапазону длин волн падающих квантов [29]. С учетом вышесказанного, мы предположили, что претендовать на роль магниторецепторов могли бы такие клеточные органеллы, как микротрубочки и микрофиламенты.

Таким образом, в процессе эволюции животного и растительного мира, магнитные поля превратились в важную информационную систему. Носителем информации в биосистемах являются кванты электромагнитного поля. Непрерывность частотных характеристик электромагнитного поля предполагает существование однозначного резонансного соответствия частотных характеристик биологи-

ческой плазмы на всех уровнях ее организации. Концепция биологической плазмы Сент Дьерди [16] связывает магниторецепцию с конформационными перестройками молекул. Предполагается, что пусковые механизмы многих геомагнитных реакций биосистем лежат на уровне молекулярных явлений и подчиняются законам квантовой механики. Исследования В. П. Казначеева и Л. П. Михайловой [30] позволяют представить биологическую систему как неравновесную фотонную констелляцию, которая существует за счет постоянного притока энергии извне. Носителем информации в биосистемах являются кванты электромагнитного поля. Исследования, проводившиеся на основании этого предположения, свидетельствуют об универсальном характере информационной связи, широком использовании электромагнитного канала в живой природе. Явление катализа позволяет ввести «информационный» подход в управление элементарными химическими реакциями и скоростями их протекания [31]. Скорость химического процесса определяется поступлением квантов с частотой фотоэффекта, которые являются пусковым сигналом начала реакции и носителем энергии для ее осуществления. Причем для каждой химической связи такой носитель сигнала и энергии является единственным.

Выводы

1. В процессе эволюции животного и растительного мира магнитные поля превратились в важную информационную систему. Носителем информации в биосистемах являются кванты электромагнитного поля. Непрерывность частотных характеристик электромагнитного поля предполагает существование однозначного резонансного соответствия частотных характеристик биологической плазмы на всех уровнях ее организации.

2. Магнитная рецепция биологических систем осуществляется посредством диа-, пара- и ферромагнетиков, входящих в состав координационных соединений и участвующих в жизненоважных химических процессах – росте, метаболизме, размножении и старении. Течение этих процессов, как и возможность ими управлять обусловлены основными свойствами магнетиков.

3. Между качественными характеристиками кванта (частота, длина волны, энергия) и химической связью координационного соединения существует однозначное соответствие. Скорость химического процесса определяется количеством квантов с частотой фотоэффекта (фотоэлектронной эмиссии), которые являются триггером биохимической реакции и носителем энергии для ее осуществления.

Библиография:

1. ГЛАЦМАЙЕР, Г., ОЛСОН, П. *Изучение геодинамо. «В мире науки»* № 7, 2005. Доступно: https://web.archive.org/web/20071030174454/http://www.sciam.ru/2005/7/nauka.shtml. [Дата обращения: 30.03.2007]
2. ЕСЬКОВ, К. *Удивительная палеонтология: история Земли и жизни на ней*. М.: ЭНАС, 2008.-312 с.
3. *Earth's Inconstant Magnetic Field NASA Science.* 25 апреля 2010 года. Available: http://science.nasa.gov/headlines/y2003/29dec_magneticfield.htm [Дата обращения: 25 октября 2014].
4. КРАВЧЕНКО, Ю. *Модель фильтра знаний для задач семантической идентификации. Известия ЮФУ. Технические науки,* № 4, 2018, с. 197-211. Enciclopedia Ecologiei.
5. DEDIU, I. *Enciclopedia Ecologiei*. Ch: Știinta, 2019, 563 с.
6. ЛАНДАУ, Л., ЛИФШИЦ Е. *Механика. Теоретическая физика* т. I., М.: Физматлит, 2012, 224 с. ISBN 978-5-9221-0819-5.
7. DIRAC, P. *Is there an Aether? B: Nature*. № 168. 1951, p. 906.
8. KOSTRO, L. *An outline of the history of Einstein's relativistic ether concept B: Studies in the history of general relativity.* Jean Eisenstaedt & Anne J. Kox. Boston-Basel-Berlin: Birkäuser. 1992, с. 260-280. ISBN 0-8176-3479-7.
9. LAUGHLIN, R. *Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down.* NY. B: Basic Books, 2005, p. 120-121. ISBN 978-0-465-03828-2.
10. *Советская энциклопедия*. М.: Т. 5. 1985, 1248 с.
11. ВЕРХОЗИН, А. *Магнитооптика вчера и сегодня.* К 170-летию открытия эффекта Фарадея. *Вестник Псковского государственного университета Серия «Естественные и физико-математические науки» Псков: Серия естественные и физико-математические науки* N 6, 2015, с. 114-124.

12. *WORLD MAGNETIC MODEL (WMM) State of the Geomagnetic Field report.* Available: https://www.ncei.noaa.gov/products/world-magnetic-model
13. ROBERTS, P., KING, E. *On the genesis of the Earth's magnetism .Reports on Progress in Physics*, 2013, 4 September (vol. 76), P. 096801. DOI: 10.1088/0034-4885/76/9/096801.
14. ВИНОГРАДОВ, А. *Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры. Геохимия.* Вып. 7, 1962, с. 555-571.
15. BERSUKER, I., YANG, L. *Electronic Structure and Properties of Transition Metal Compounds: Theory and Applications* (с). Третье издание. Нью-Йорк: John Wiley & Sons, 2025, 864 pp.
16. ШРАЙВЕР, Д., ЭТКИНС, П. *Неорганическая химия.* М.: Мир, 2004. Т. 1, с. 359, 679 с. ISBN 5-03-003628-8.
17. *Химическая энциклопедия.* М.: Большая российская энциклопедия, 1999. Т. 5, 783 с. ISBN 5-85270-310-9.
18. HUTCHISON, Z. et al. *Electromagnetic Field (EMF) Impacts on Elasmobranch (shark, rays, and skates) and American Lobster Movement and Migration from Direct Current Cables. U.S. Department of the Interior Bureau of Ocean Energy Management Office of Renewable Energy Programs March.* 2018, 254 p.
19. *Патологическая анатомия:* Курс лекций / под ред. В. В. Серова, М. А. Пальцева. — М.: Медицина, 1998, с. 58. ISBN 5-225-02779-2.
20. QIN, S. , YIN, H. et al. *A magnetic protein biocompass Nature materials. Advance online publication,* 2015, p. 1-14. Available: https://www.nature.com/naturematerials.
21. ZHAO, Y. et al. *Analysis of magnetic elements in otoliths of the macula lagena in homing pigeons with inductively coupled plasma mass spectrometry. Neurosci. Bull.* 25, 2009, p 101–108. https://doi.org/10.1007/s12264-009-0311-y
22. LIU, B., LIU, H., ZHONG, D., LIN, C. *Searching for a photocycle of the cryptochrome photoreceptors. Curr Opin Plant Biol*. 13(5), 2010, p. 578-86. DOI: 10.1016/j.pbi.2010.09.005
23. PIKKARDI ,G. *The chemical basis of medical climatology.* USA: Springfield. 1962, 146 p.
24. АГАДЖАНЯН, Н., МАКАРОВА И. *Магнитное поле Земли и организм человека. Экология человека* М: № 9, 2005, с. 3-9.
25. ROBERT, B. COREY, L. *Molecular Models of Amino Acids, Peptides, and Proteins. B: Review of Scientific Instruments*, Volume 24, Issue 8,1953, p. 621-627. DOI:10.1063/1.1770803.
26. ПАВЛОВ, А., ФЕЙЗУЛИН, Р. *Физические особенности воздействия на эритроциты статических магнитных полей при наличии пространственного градиента. Вестник СГТУ,* № 1(82), 2016, с. 39-48.
27. ЛЕДНЁВ, В. *Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных магнитных полей. Биофизика*, 1996, т. 41, с. 224-234.
28. LIBOFF, A. *On the nature of electromagnetic field interactions with biological systems.* Ed. A. N. Frey, R. J. Langes Co. Austin. 1994, 59-72.
29. ГРИГОРЯН, Г. *Магниторецепция и механизмы действия магнитных полей на биосистемы*. Ереван: Гитутюн, 1995, 54 с.
30. КАЗНАЧЕЕВ, В., МИХАЙЛОВА, Л. *Биоинформационная функция естественных электромагнитных полей.* Новосибирск: Наука, 1985, 180 с.
31. NICEWICZ, D., MACMILLAN, D. *Merging Photoredox Catalysis with Organocatalysis. The Direct Asymmetric Alkylation of Aldehydes. Science,* 2008-10-03. Vol. 322, iss. 5898, p. 77–80. ISSN 0036-8075.

Данные об авторе:
Ирина КОЛОМИЕЦ, старший научный сотрудник, Институт Экологии и Географии, Государственный Университет Молдовы.
ORCID: 0009-0009-5185-435
E-mail: ikolomiec71@gmail.com

Получено: 01.03.2025