

Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы

Т.К. Бреус, В.Н. Бинги, А.А. Петрукович

Совокупность современных данных гелиобиологии позволяет говорить о том, что биологическое действие весьма слабых переменных магнитных полей, связанных с солнечной и геомагнитной активностью, является реальностью. Геомагнитные возмущения могут вызывать в человеческом организме неспецифическую реакцию по типу общего адаптационного синдрома, возникающего под действием любых внешних факторов стресса. Возможно развитие и специфических реакций. Одной из обсуждаемых причин сходства био- и гелиогеофизических ритмов является прямое действие геомагнитных вариаций на организмы. Однако механизмы магниторецепции всё ещё не ясны. Приведён краткий обзор современного состояния наблюдений и экспериментов, а также теоретических работ по этой фундаментальной междисциплинарной проблеме.

Ключевые слова: геомагнитные возмущения, ритмы биологических и геомагнитных показателей, механизмы магниторецепции, магнитобиология

PACS numbers: 87.10. – e, 87.18.Yt, 87.50. – a, 94.30.Va

DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037693

Содержание

1. Введение (568).
 2. Сравнение гелиогеофизических и биологических данных (569).
 3. Физические проблемы и механизмы (571).
 - 3.1. Тематика магнитобиологии. 3.2. Возможные физические механизмы магниторецепции.
 4. Заключение (575).
- Список литературы (576).

1. Введение

Основоположником исследований влияния солнечной активности на биосферу Земли и науки гелиобиологии является наш соотечественник Александр Леонидович Чижевский. В первой трети XX в. он показал, что эпидемические заболевания, социальные потрясения, урожайность, всплески количества внезапных смертей от сердечных причин коррелируют с солнечной активностью (числом солнечных пятен) [1]. Чижевский считал, что "одновременность колебаний солнечной и человеческой деятельности служит лучшим указанием" на их физическую связь. Хотя впоследствии некоторые выводы Чижевского не подтверди-

лись, его теория оставила глубокий след в истории науки, а в России представления о влиянии солнечной активности на здоровье человека с тех пор являются существенной частью общественного сознания.

Только несколько десятилетий спустя, в 1950–1960-е годы, в результате первых космических полётов были открыты магнитосфера Земли — магнитная оболочка нашей планеты — и солнечный ветер — поток плазмы солнечной короны с межпланетным магнитным полем, воздействующий на магнитосферу. Характерными признаками этого воздействия являются, например, геомагнитные вариации (возмущения) и полярные сияния, практически каждый день наблюдаемые в полярных областях Земли. Проявления солнечной активности, такие как солнечные вспышки и корональные дыры, приводят к аномальным усилениям солнечного ветра, вызывающим уже более глобальные возмущения по всему земному шару, называемые геомагнитными бурями. Помимо собственно вариаций геомагнитного поля усиливаются ионосферные электромагнитные шумы в различных диапазонах частот, инфразвуковые колебания атмосферы, происходят высыпания энергичной плазмы в атмосферу и пр. [2]. Магнитные бури в целом часто характеризуют именно уровнем геомагнитных возмущений (геомагнитной активностью — ГМА).

Наиболее широко используемый для общей оценки ГМА Кр-индекс представляет собой максимальную амплитуду горизонтальной составляющей геомагнитного поля на протяжении трёхчасового интервала, выраженную в логарифмической девятибалльной шкале и усреднённую по нескольким геомагнитным обсерваториям средних и умеренно высоких широт. Кр выше 4 баллов соответствует геомагнитной буре. Другой индекс ГМА, Dst, представляет собой максимальное отклонение магнитного поля от спокойного уровня на четырёх магнитных станциях в экваториальных широтах. Dst-индекс менее –50 нТл соответствует умеренной геомагнитной буре.

Т.К. Бреус, А.А. Петрукович. Институт космических исследований РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
E-mail: breus36@mail.ru, apetruko@iki.rssi.ru

В.Н. Бинги. Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, ул. Вавилова 38, 119991 Москва, Российская Федерация
E-mail: binhi@kapella.gpi.ru
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, биологический факультет, Ленинские горы 1, стр. 12, 119991 Москва, Российская Федерация

Статья поступила 20 января 2016 г.

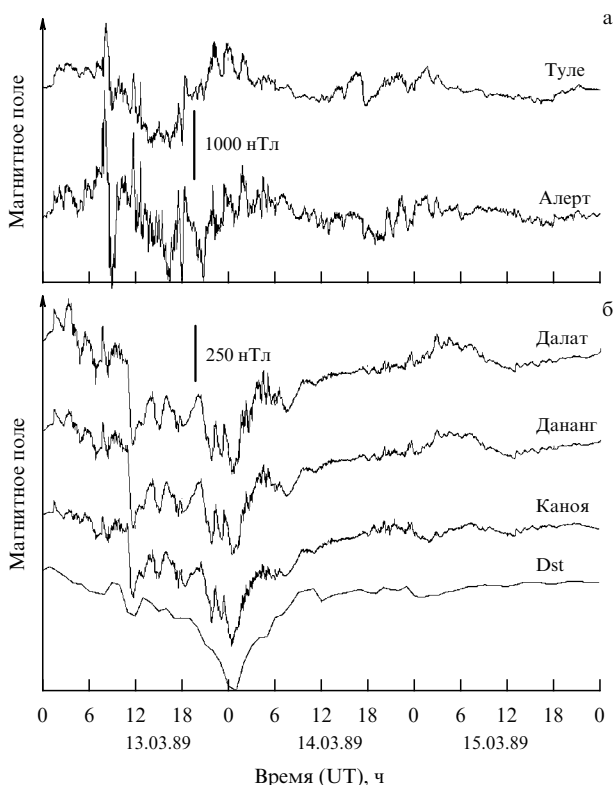


Рис. 1. Магнитограммы горизонтальной составляющей геомагнитного поля в полярной зоне (Туле и Алерт) (а), экваториальной зоне (Далат и Дананг), на средних широтах (Каноя) и Dst-вариация (б) за период 13–15 марта 1989 г. [3].

Амплитуда вариаций геомагнитного поля во время бурь составляет порядка 1000 нТл в полярных областях Земли и порядка 100 нТл на средних и низких широтах при величине геомагнитного поля 30000–50000 нТл (рис. 1) [3].

В связи с тем что геомагнитные вариации малы по сравнению с полным полем и помехами технического происхождения (то же можно сказать и о других физических факторах влияния), механизмы влияния малых полей на биологические объекты непонятны, а статистические исследования не всегда приводили к устойчивым и воспроизводимым результатам, в 1970-х годах возник серьёзный скептицизм по отношению к гелиобиологии.

Тем не менее современные исследования с использованием компьютерных методов анализа данных позволили надёжно зафиксировать наличие статистически достоверной корреляции между геомагнитными возмущениями и различными характеристиками биологических объектов и человеческого организма на различных уровнях. «И если в начале исследований эта взаимосвязь — по крайней мере для его современников — могла ещё носить "оттенок" натурфилософии, то сегодня она лишена какой бы то ни было мистичности: гелиобиология стала частью естественнонаучных дисциплин со строгой методологией и опорой на эксперимент» (из предисловия Л.М. Зелёного к [1]).

В целом, можно сформулировать следующую основную гипотезу, в пользу которой говорят результаты значительного числа работ и которой мы будем придерживаться в дальнейшем изложении: 1) главным фактором воздействия ГМА являются непосредственно вариации геомагнитного поля; 2) это воздействие достаточно слабое по сравнению с другими эффектами (факторы погоды, стрессы и пр.); 3) его проявления на уровне организма человека сугубо индивидуальны и в основном носят неспецифический характер, сходный с адаптационным стрессом, свойственным любым другим факторам воздействия. Далее, в разделе 2 мы приводим обзор результатов статистических исследований, а в разделе 3 — обзор экспериментальных и теоретических исследований возможных механизмов влияния магнитного поля на живые организмы.

2. Сравнение гелиогеофизических и биологических данных

Одной из первых иллюстраций возможной взаимосвязи гелиогеофизических и медицинских данных стало сравнение их общей периодичности [4–6]. Временные ряды геомагнитной активности содержат в себе ритмы (т.е. имеют пики в частотных спектрах) на периодах, характерных для периода вращения Солнца и его гармоник: $\approx 28, \approx 14, \approx 9, \approx 6,8, \approx 5,4, \approx 4,5$ сут и др. (рис. 2а). В то же время о наличии схожих инфранидных (с периодом более чем одни сутки, в том числе околосемисуточных) ритмов у человека известно ещё с античных времён по характерным временам развития обострений различных заболеваний (см. подробнее в [6]), а также по современным данным, например, по развитию отторжений трансплантатов при операциях по пересадке почек и сердца (рис. 2б) [4, 6].

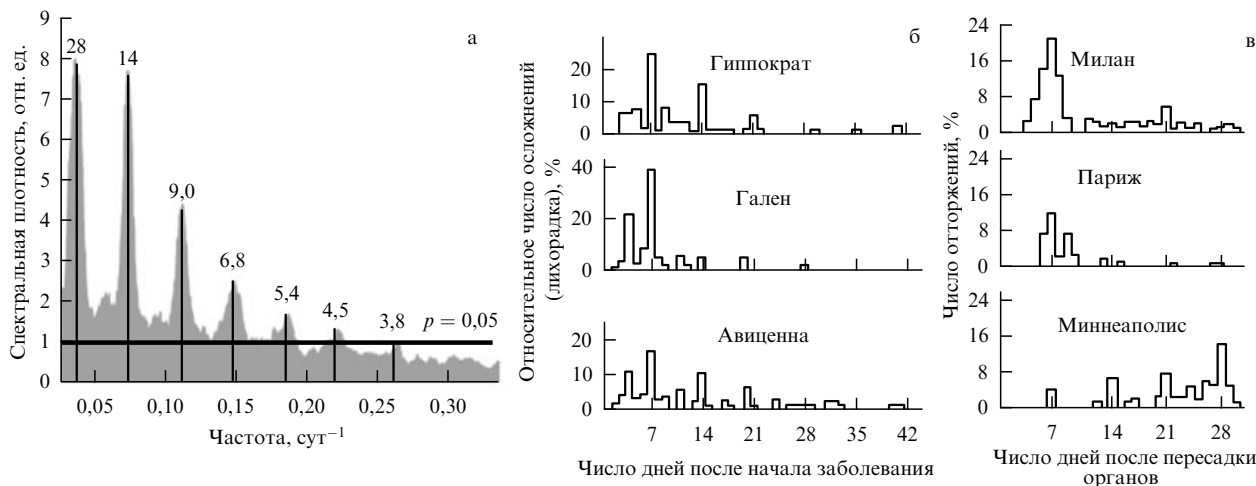


Рис. 2. (а) Спектр вариаций Кр-индекса за 28 лет (1968–1996 гг.), p — вероятность ошибки при отрицании нулевой гипотезы в случае, если она верна. (б) Ритмы обострений лихорадки, рассчитанные по протоколам античных врачей. (в) Ритмы отторжения трансплантатов после операций при пересадке почек и сердца [4, 6].

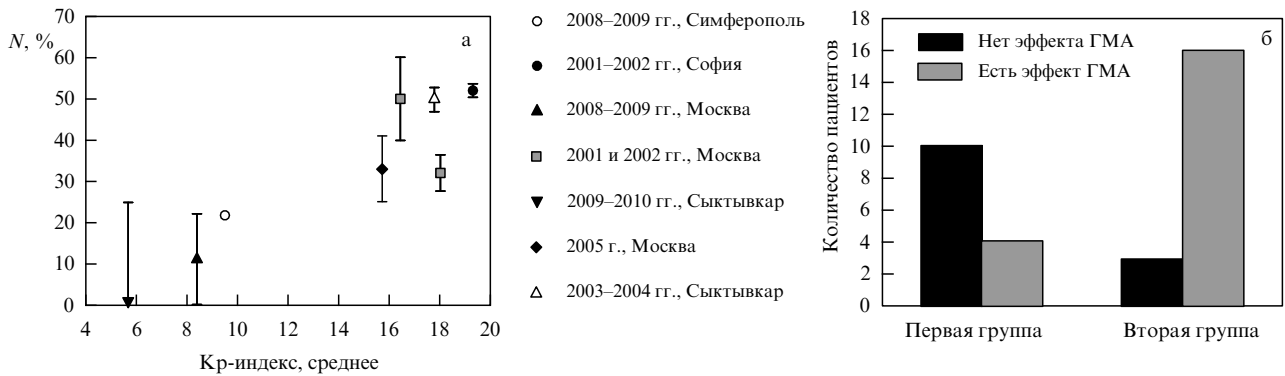


Рис. 3. (а) Магниточувствительность здоровых добровольцев [17]. (б) Магниточувствительность пациентов, страдающих гипертонической болезнью: первая группа — лёгкие больные, вторая группа — тяжёлые больные [14].

Данное достаточно простое наблюдение позволило впервые выдвинуть гипотезу о влиянии геомагнитной активности на биологические объекты именно в терминах биоритмов. Периодичность такого внешнего фактора воздействия, как геомагнитные вариации, могла на начальных стадиях эволюции способствовать возникновению сходной ритмики в биологических объектах, а с бои этой периодичности, создаваемые нерегулярной аперидической компонентой ГМА (магнитными бурями), могли вызывать десинхронизацию биологических ритмов, подобный десинхронизации циркадианных (суточных) ритмов, возникающему при трансконтинентальных перелётах. Примерно 28-суточный цикл присутствует и в орбитальном движении Луны, однако нарушения в периодичности лунного воздействия сложно себе представить.

Ввиду отсутствия детального понимания механизма воздействия геомагнитных колебаний их связь с различными физиологическими параметрами изучается в первую очередь эмпирически с помощью корреляционного и регрессионного анализа. Необходимо иметь в виду, что с учётом относительной слабости эффекта по сравнению с другими, например социальными и метеорологическими факторами, искомое отношение сигнал/шум в исследуемых временных рядах существенно меньше единицы. Это приводит к достаточно малым коэффициентам корреляции и высокой чувствительности результатов к характеристикам доминирующего шума, что требует повышенного внимания при отборе данных и их обработке.

В настоящее время для анализа доступен достаточно широкий выбор данных, включающий в себя: многолетнюю медицинскую статистику основных заболеваний [7–14]; данные длительного, часто многолетнего, мониторинга основных физиологических параметров отдельных испытуемых [7, 8], в частности космонавтов [15]; результаты различных клинических и лабораторных наблюдений за группами больных и здоровых людей [16]. Многочисленные исследования привели авторов к выводу, что действие слабых геомагнитных полей на биологические объекты является надёжно установленным фактом. Ниже приведены некоторые примеры.

На рисунке 3а показана доля "магниточувствительных" (т.е. имевших статистически значимую корреляцию Кр-индекса с артериальным давлением и частотой сердечных сокращений) здоровых добровольцев, исследовавшихся в различных регионах северного полушария (Симферополь, Москва, София (Болгария), Сыктывкар) [17]. В каждой из групп было от 16 до 60 человек, наблюдавшихся отдельно в годы минимума (2008–2010 гг.) и максимума (2001–2005 гг.) солнечной и геомагнитной активности. Магнито-

чувствительность возрастает с увеличением Кр-индекса, и при суммарных за сутки значениях последнего, больших 15, доля достоверных корреляций в группах достигала 60%.

На рисунке 3б показана доля людей с достоверной корреляцией геомагнитной активности и артериального давления в двух группах пациентов с гипертонической болезнью (33 человека, лечившихся в Научно-исследовательском институте кардиологии им. А.Л. Мясникова в период с 2001 по 2003 гг.) [14]. В число пациентов входили больные с лёгкой степенью гипертонии (первая группа) и больные с более многоплановыми нарушениями сердечной деятельности (вторая группа). Большинство магниточувствительных людей (80%) оказалось среди пациентов второй группы, в первой группе магниточувствительных было всего 20%, т.е. при наличии серьёзной патологии сердечно-сосудистой системы чувствительность к геомагнитному фактору возрастала. Необходимо отметить, что до настоящего времени, несмотря на достигнутые успехи, лечение больных артериальной гипертензией остаётся малоэффективным. Так, на практике снижение повышенного давления до целевого уровня достигается лишь у 12–30% больных [18]. Существует целый ряд причин, препятствующих достижению конечной цели гипотензивного и антиангинального лечения, одна из которых — метео- и магнитозависимость [19, 20].

На рисунке 4а показана зависимость напряжённости сосудистого тонуса (характеризуемой эндотелиальной функцией (ЭФ), измеряемой в процентах [21]) от К-индекса у здоровых добровольцев (10 практически здоровых человек в Научно-клиническом центре открытого акционерного общества (ОАО) "Российские железные дороги" (РЖД)) в течение полутора лет. Оказалось, что зависимость от геомагнитного индекса проявляется в основном при благоприятных погодных условиях (температура более 6 °С, атмосферное давление менее 770 мм рт.ст. и влажность более 38%).

На рисунке 4б показаны изменения продукции некоторых гормонов во время геомагнитных бурь относительно продукции тех же гормонов в геомагнитно-спокойные периоды для пациентов с ишемической болезнью сердца и гипертонической болезнью. Исследование 22 пациентов проводилось в Первом Московском государственном медицинском университете им. И.М. Сеченова. Наибольшим изменениям подвержены гормоны надпочечников кортизол и норадреналин (стрессорные гормоны), а также гормон эпифиза мелатонин [22, 23]. Мелатонин является адаптогеном и иммуномодулятором и отвечает за формирование суточного ритма; во время бури его содержание изменяется. Соответственно, отклонения содержания мела-

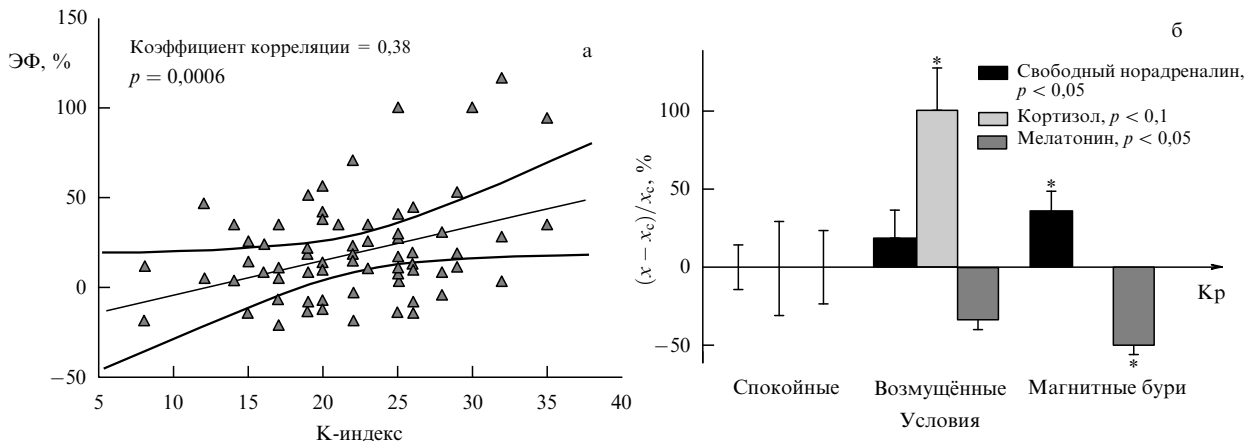


Рис. 4. (а) Зависимость напряжённости сосудистого тонуса (ЭФ — эндотелиальная функция) от К-индекса [21]. Треугольниками показаны данные наблюдений, соответствующие определённым погодным условиям, кривые соответствуют 5%-ному доверительному интервалу условного по К-индексу среднего значения ЭФ. (б) Изменения продукции гормонов симпато-адреналовой системы (норадреналина, кортизола) и эпифиза (мелатонина) у пациентов с ишемической болезнью сердца и гипертонической болезнью во время возмущённых условий и во время геомагнитных бурь относительно продукции этих гормонов у той же группы пациентов при спокойных геомагнитных условиях; x — текущие значения, x_c — значения при спокойных геомагнитных условиях. Звёздочками (*) около отрезков ошибок отмечены достоверные различия.

тонина от нормы приводят к десинхронизации суточных ритмов.

Возрастание продукции кортизола на 30% и уменьшение секреции гормонов щитовидной железы в крови вплоть до 30% во время возмущённых условий были выявлены и в эксперименте Института физиологии Уральского отделения РАН по наблюдениям за 980 здоровыми добровольцами на самом северном обитаемом месте на Земле — Шпицбергене [24].

В целом, из многочисленных исследований следует, что геомагнитные возмущения могут вызывать в человеческом организме неспецифическую реакцию по типу общего адаптационного синдрома, возникающего при воздействии любых внешних факторов, вызывающих стресс. Возможно развитие и специфической, схожей с метеотропной, реакции, протекающей с изменением сосудистого тонуса. Фактор геомагнитной активности не является непосредственной причиной болезни, он лишь провоцирует её или способствует обострению уже имеющегося патологического процесса вплоть до возникновения серьёзных последствий. У здоровых людей с повышенной метеочувствительностью могут появиться функциональные нарушения, влияющие на качество жизни. При этом конкретная динамика физиологических показателей у разных людей может быть различной.

3. Физические проблемы и механизмы

3.1. Тематика магнитобиологии

Природные электромагнитные поля не только чрезвычайно малы по сравнению с техническими помехами, но и кажутся слишком слабыми для того, чтобы воздействовать на биохимические процессы в живых системах. Тем не менее проблема возможного действия слабого магнитного поля достаточно актуальна, и не только с учётом данных по гелиобиологии. Например, широко известен факт магнитной навигации перелётных птиц. Большая часть населения испытывает хроническую экспозицию всё возрастающим фоновым полям промышленных частот. Исследования по данному направлению являются темой науки магнитобиологии — одного из направлений биофизики.

Заметное развитие магнитобиологии началось с 1960-х годов. В то время появились первые генераторы миллиметрового излучения. Было обнаружено, что такие излучения способны вызывать биологическую реакцию [25]. Особенно эффективными являлись микроволны с низкочастотной модуляцией. Поэтому вскоре нашли, что и сам модулирующий сигнал в виде низкочастотного слабого поля, порядка геомагнитного, может действовать на организмы, в том числе на онкологические процессы. С одной стороны, такое действие казалось невозможным, поскольку биологические ткани диамагнитны, а индукционные токи исчезающе малы. С другой стороны, даже небольшой шанс на реальность нетеплового действия слабых полей выглядел значимым.

Национальные и международные программы изучения закономерностей магнитобиологии большого успеха не имели [26]. Установить условия, надёжно контролирующее возникновение магнитного биологического эффекта, не удалось. Проблема и сейчас не решена полностью, хотя накоплен наблюдательный и экспериментальный материал значительного объёма.

В магнитобиологии имеется несколько выделенных направлений, до последнего времени мало связанных между собой. В таблице приведены наименования направлений, оценки воспроизводимости результатов и степени определённости в поисках "мишени", на которую действует магнитное поле, рассматриваемые уровни магнитного поля, а также основные журналы (области науки), в которых публикуются результаты.

Наиболее представительна с научной точки зрения область исследований так называемой магнитной навигации животных. Установлено, что многие сезонно мигрирующие животные используют геомагнитное поле (около 50 мкТл) для ориентации во время миграций (см., например, [27]). Поскольку одной только магнитной ориентации недостаточно для поиска мест обитания, обсуждают способность животных чувствовать кроме горизонтальной компоненты геомагнитного поля его вертикальную компоненту [28] либо другую пару характеристик: величину и наклонение. Этого было бы уже достаточно для однозначной привязки к географическим координатам, поскольку магнитный рельеф Земли уникален. Реализуя "чувство карты", некоторые животные демонстрируют чувствительность к магнитным полям на уровне 15–30 нТл [29]. Магнитной

Таблица. Структура исследований в области магнитобиологии

Характеристика	Лабораторная магнитобиология	Магнитная навигация животных	Эпидемиология электромагнитных полей	Гелиобиология
Воспроизводимость результатов	Расхождение в оценках	Нормальная	50/50	50/50
Мишень магнитного поля	Неизвестна	Заявлена	Неизвестна	Неизвестна
Минимальные магнитные поля	20 нТл	15–30 нТл	300 нТл	1–1000 нТл
Число публикаций	30000–40000	4000–7000	300–500	1000–1500
Журналы	<i>Bioelectromagnetics</i> , <i>EM Biol. Medicine</i> , <i>Bioelectrochem. Bioenerg.</i> ...	<i>Nature</i> , <i>Science</i> , <i>Phys. Rev.</i> , <i>Biophys. J.</i> ...	В основном медицинские журналы	<i>J. Atm. Sol.-Terr. Physics</i> , <i>Adv. Space Res.</i> , <i>Life Sci. Space Res.</i> ...

навигационной способностью обладают и в некоторой степени обучаются навигации птицы [30], амфибии [31], черепахи [32] и др. [33].

Воспроизводимость результатов экспериментальных работ с животными в целом приемлема (см., например, [34]), а мишенью, на которую воздействует магнитное поле, предположительно являются либо скопления магнитных наночастиц вблизи нервов [35–37], либо бирадикалы криптохромов сетчатки глаза [38, 39], либо синергизм наночастиц и бирадикалов [40].

С данными конкретными механизмами до конца не разобрались, поскольку каждый из них имеет серьёзные трудности с точки зрения физики. Неясность микроскопического механизма магниторецепции вообще является основной проблемой, вне зависимости от поведенческих реакций мигрирующих животных.

Выяснением общей физико-химической основы магниторецепции занимается лабораторная магнитобиология, в которой исследуют реакции разных организмов — от биохимических систем и отдельных клеток до целостных организмов и их групп. Главной задачей является определение биохимических сигнализаторов, вовлечённых в магниторецепцию на самых первых её стадиях. Поэтому основные среди измеряемых величин — это концентрации разнообразных веществ в организмах и скорости их изменения.

Воспроизводимость результатов лабораторной магнитобиологии оставляет желать лучшего. Наблюдаемый эффект зависит от множества контролируемых и неконтролируемых физико-химических и физиологических факторов. Их сложное взаимодействие делает наблюдение эффекта, согласованного с ожиданиями или теоретическими предсказаниями, экспериментальной удачей, в определённом смысле находкой исследователя. В большинстве случаев магнитная экспозиция приводит в целом к случайному неспецифическому биологическому эффекту, обычно величиной не более 10–15%. Указанная особенность вызывает затруднения при репликации опытов независимыми группами. Например, действие магнитного поля на активность мелатонина — гормона, участвующего в регуляции иммунитета и способности организма человека противостоять развитию онкологических заболеваний, — исследовали более чем в десяти лабораториях. Только в половине из них наблюдали статистически значимый эффект [41].

Факт биологической рецепции полей уровня 1000 нТл был установлен достоверно. Несколько научных групп зарегистрировали действие полей уровня в несколько десятков нТл на различные процессы в растворах аминокислот [42], однако связь этих результатов, как и других биохимических реакций *in vitro*, с магнитным биологическим эффек-

том *in vivo* остаётся под вопросом [43]. Имеются и прямые свидетельства биологического действия столь малого поля [44, 45], но число таких работ всё ещё мало. Всего около ста публикаций сообщают о наблюдении амплитудной и частотной селективности магнитных эффектов (см. обзор в [46]), чего явно недостаточно для надёжных выводов о возможной физической природе явления.

Магнитные эффекты, столь особенные в малом пространственно-временном масштабе лаборатории и потому малозаметные в биологических флуктуациях, должны быть видны в глобально усреднённых величинах. К ним относятся эффекты хронических воздействий на популяции. В таких режимах наблюдения все непредсказуемые в малом масштабе вариации сведены к минимуму. Это направление эпидемиологии электромагнитных полей [47], в том числе стандартизации безопасных режимов экспозиции в таких полях [48, 49]. Основной проблемой является селекция корректной контрольной выборки, чему препятствует сильное влияние на статистику других популяционных факторов (уровни экспозиции и заболеваемости коррелируют с социальными факторами).

На основании нескольких десятков эпидемиологических исследований и нескольких их метаанализов Международное агентство по исследованию рака (International Agency for Research on Cancer — IARC) признало некоторые электромагнитные поля возможными канцерогенами. Это поля промышленных частот, превышающие 300 нТл [50], и поля сотовых телефонов [51].

Определённой проблемой остаётся несоответствие стандартов электромагнитной безопасности друг другу. Некоторые стандарты различных стран и организаций в отдельных частотных диапазонах разнятся на 3–4 порядка (рис. 5). Это говорит, кроме того, об отсутствии надёжного понимания механизмов магниторецепции. Слабо изучены и риски, связанные с хроническим пребыванием в медленно изменяющемся магнитном поле (типа магнитной бури) и в магнитном вакууме (постоянном поле, сильно ослабленном относительно геомагнитного).

Многочисленные факты биологической рецепции нанотесловых полей в первых двух областях магнитобиологии (см. таблицу) подкреплены также наблюдением гелиобиологических корреляций. В основном они представлены, как следует из разделов 1, 2, в форме корреляций между уровнем геомагнитной возмущённости — интегральным фактором солнечно-земных связей — и показателями состояния высших организмов. Эти корреляции не доказывают прямого действия сверхслабых полей, но и не исключают его. Интересно, что корреляции геомагнитной возмущённости с навигацией птиц в терминах прямого действия изучают с 1950-х годов [52], и сегодня исследователи говорят именно о прямом действии.

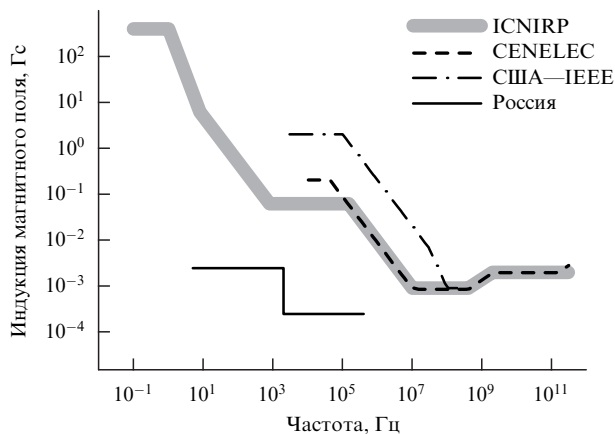


Рис. 5. Предельно допустимые уровни магнитной компоненты для населения. Сплошной линией показаны нормативы, соответствующие российским "Санитарным нормам и правилам" (СанПиН 2.2.2./2.4.1340-03). ICNIRP — International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, IEEE — Institute of Electrical and Electronics Engineers, CENELEC — от франц. Comité Européen de Normalisation Électrotechnique.

3.2. Возможные физические механизмы магниторецепции

То, что за 30–40 лет не удалось добиться удовлетворительного объяснения магниторецепции, порождает стремление прийти к механизму первичной рецепции дедуктивно, "из первых принципов".

Основные факты магнитобиологии хорошо известны: 1) биологический эффект может возникать в полях с исчезающе малым тепловым или индукционным действием; 2) биологический эффект является нелинейным, в частности может содержать участки убывания при возрастании магнитного поля [53]; 3) биологический эффект малопредсказуем. Первый факт, называемый иначе "проблемой kT ", наиболее удивителен. Его можно выразить неравенством $mH \ll kT$, где H — величина магнитного поля, m — магнитный момент предполагаемой мишени, k — постоянная Больцмана, T — эффективная температура мишени. Магнитная энергия электрона, например, в геомагнитном поле равна $2,9 \times 10^{-9}$ эВ, что на семь порядков меньше величины kT при физиологических температурах.

Непонятно, каким образом изменение магнитной энергии, намного меньшее масштаба тепловых флуктуаций, влияет на ход химической реакции, а такое влияние необходимо для возбуждения биологического отклика. Другими словами, правильное объяснение должно превратить вышеуказанное неравенство хотя бы в приблизительное равенство.

Одна из основных гипотез утверждает, что мишень обладает большим магнитным моментом. Например, магнитные наночастицы могут возникать в организмах естественным образом, а также попадать в них извне, и это снимает проблему [54]. Однако нетепловые эффекты известны и в тех организмах, где магнитных наночастиц заведомо нет. Поэтому продолжается поиск молекулярных механизмов магниторецепции. Часто рассматривают простейшие микроскопические одночастичные системы: заряженный осциллятор или ротатор, спиновый магнитный момент.

В отношении молекулярного механизма приходится предполагать — для преодоления вышеуказанного неравенства, что мала эффективная температура мишени. Это возможно только в том случае, когда малы эффекты диссипации, обусловленные взаимодействием динамической

системы с термостатом. Диссипацией можно пренебречь, если эволюция релевантных степеней свободы завершается до установления теплового равновесия, т.е. если время жизни этих степеней меньше времени их тепловой релаксации. Такие степени свободы известны — это, например, промежуточные спин-коррелированные состояния пар радикалов в магнетохимических реакциях.

Однако диссипация — не единственная причина, препятствующая надёжному преобразованию сигнала магнитного поля в изменение скорости химической реакции. Другим препятствием является инерция: конечное изменение скорости обобщённой координаты не возникает одновременно с приложением силы, а является линейной функцией времени. Соответственно, энергия и изменение координаты пропорциональны t^2 . Тогда при малых магнитных силах, обычных для магнитобиологии, энергия частицы с элементарными зарядом и массой приобретает (в наиболее благоприятном случае) уровень kT через нереально большое время даже в отсутствие диссипации.

Есть ли безынерционные механизмы? Да, они основаны на закономерностях динамики углового момента и квантовой фазы. Конечная угловая скорость свободной прецессии возникает одновременно с приложением момента сил и не зависит от времени явно. Это является следствием вырожденности энергии вращения по направлению момента. Таким образом, направление углового момента можно менять пропорционально t , т.е. безынерционно. Аналогичная закономерность имеет место и для квантовой фазы, которая также не связана с энергией квантовой частицы.

Безынерционными являются наиболее перспективные и часто обсуждаемые гипотетические молекулярные механизмы магниторецепции, рассматривающие влияние магнитного поля на: а) скорость реакций с участием спин-коррелированных пар радикалов [55, 56]; б) квантовые вращения молекулярных групп внутри белков [57, 58]; в) локальный спиновый и структурный порядок в жидкой воде [59–62]. Подробный анализ квантовых механизмов, связанных с эффектом Зеемана, как и множества других, проведён в [46].

Несмотря на то что все эти макроскопические и молекулярные механизмы магниторецепции обсуждаются сравнительно давно, ни один из них, как и первичная мишень, не идентифицирован экспериментально. Дело в том, что результаты теоретических расчётов, как правило, зависят от большого числа параметров и связать их с наблюдаемыми в эксперименте закономерностями обычно затруднительно. Поэтому актуальны более общие модели, которые должны быть неперменным звеном специфических биофизических механизмов рецепции малых магнитных полей.

В одной из таких моделей [63] рассмотрена неравномерная прецессия магнитного момента в магнитном поле, изменяющемся по величине, но не по направлению. Квантовых переходов такое поле не вызывает, и допустима классическая модель ларморовой прецессии. Оказывается, этот режим прецессии обладает свойствами, сопоставимыми с наблюдаемыми свойствами магниторецепции. В ряду последовательных стадий преобразования сигнала магнитного поля эта ранее не выявленная, чисто физическая, стадия предшествует любому биофизическому или биохимическому механизму и во многом определяет нелинейные и спектральные свойства биологического отклика. Объекты в биологических клетках, обладающие магнитным моментом, — это неспаренные электроны, парамагнитные ионы, протоны и другие магнитные ядра. Виртуальным магнитным моментом могут обладать связанные с белками ионы и вращения молекулярных групп с распределённым зарядом.

Рассматриваемый механизм опирается на следующие положения: внешнее поле действует на магнитный момент; магнитный момент прецессирует, а также испытывает тепловую релаксацию. Биологический эффект возникает, если за время релаксации или меньшее время удаётся внести в динамику магнитного момента заметное возмущение. Мерой возмущения является отклонение прецессии магнитного момента от состояния невозмущённой равномерной прецессии в геомагнитном поле. Идеализации модели: 1) равномерная прецессия — естественный фон, на котором разворачиваются микроскопические события в организмах; 2) события следующего уровня — биофизические или биохимические события мишени — образуют нестационарный пуассоновский поток, темп которого периодически зависит от фазы прецессии в локальной системе координат мишени; 3) биологический эффект связан с возмущением прецессии магнитных моментов какого-то одного типа, усреднённым по времени и по реализациям случайно ориентированных локальных систем координат. Конечно, биологический эффект становится наблюдаемым, только если изменения на биофизическом уровне проходят через стадии трансформации на биохимическом, физиологическом и системном биологическом уровнях.

Усреднённая вероятность биофизических событий — её зависимость от магнитного поля при $\beta\tau < 1/4$ — имеет в рамках данного сценария, как показано в [63], следующий приближённый вид:

$$P(H, h) = \beta\tau - \frac{1}{2}\beta^2\tau^2 - \frac{1}{4}\beta^2\tau^2 \sum_n J_n^2\left(\frac{\gamma h}{\Omega}\right) \text{sinc}^2\left[\frac{(\gamma H - n\Omega)\tau}{2}\right], \quad (1)$$

где J_n — функция Бесселя n -го порядка, $\text{sinc } x = x^{-1} \sin x$. Соотношение связывает шесть минимально необходимых переменных. Три переменные — это параметры магнитного поля: его постоянная компонента H , амплитуда h и частота Ω переменной компоненты. Три другие переменные — это гиромагнитное отношение γ и параметры τ (время релаксации) и β , описывающие соответственно тепловое и "сигнальное" взаимодействие магнитного момента с ближайшим окружением.

Можно показать, что эффекты постоянного магнитного поля, в частности эффект "магнитного вакуума", и эффекты переменного поля, $P(H, h) - P(H, 0)$, являются разнонаправленными и разделяются — они описываются вторым и первым сомножителями под знаком суммы в (1) соответственно. Переменное поле вызывает наибольший эффект, если его частота выбирается равной $\Omega = \gamma H$. В таком случае зависимость от амплитуды пропорциональна $J_1^2(h/H)$ — это соотношение иногда наблюдают в эксперименте.

Данный физический механизм не исключает конкретных молекулярных биофизических механизмов магниторецепции, но является неперенным компонентом любого такого механизма.

Из соотношения $\Omega = \gamma H$ следует, что амплитуда и частота магнитного поля не совсем произвольны: для наблюдения магнитного эффекта их надо подобрать в соответствии с гиромагнитным фактором мишени одного типа. Другие мишени — с гиромагнитным фактором, отличным от $\gamma = \Omega/H$, — при этой комбинации частоты и амплитуды останутся невозмущёнными. Напротив, в "магнитном вакууме", при $H = h = 0$, возмущёнными оказываются все мишени, вне зависимости, как следует из (1), от их гиромагнитного фактора. Магнитный вакуум — это условия, например, в будущих межпланетных полётах — определён в сравнении с условиями, в которых h или H (или обе эти величины одновременно) существенно больше

$1/(\gamma\tau)$, согласно многим экспериментальным данным это уровни порядка 100–1000 нТл. Другими словами, экспериментатор имеет гораздо больше шансов наблюдать магнитобиологический эффект в гипомагнитном поле $h < H < 1/(\gamma\tau)$, чем в постоянно-переменном поле даже с оптимальным соотношением Ω и H . Можно заключить, например, что по чисто физическим причинам нежелательная реакция организма на пребывание в условиях магнитного вакуума в дальнем космическом полёте более вероятна, чем реакция того же организма на магнитную бурю на Земле.

Проблема kT фокусирует внимание на несопоставимости магнитной энергии мишени и масштаба тепловых возмущений ($mH \ll kT$). В отношении молекулярных мишеней это означает, что эффективная температура мишени весьма мала, т.е. время тепловой релаксации τ велико. Из работы [63] следует, что заметные по величине эффекты, превышающие несколько процентов, возникают при условии $\gamma H\tau > 0,1$, т.е. при достаточно больших τ , что совпадает с условием преодоления проблемы kT . Насколько реальны мишени с большим τ ? В [64] рассчитали теоретически, что если бирадикальный механизм (см., например, [56]) имеет отношение к магнитной навигационной способности и её "выключению" в слабом переменном поле, то в организме должны существовать электронные спиновые состояния с невероятно большим временем релаксации, порядка 0,1 мс. В [29] исходя из наблюдаемой чувствительности магниторецептора птиц 15 нТл, связывая её с тем же механизмом, находят время τ около 10 мкс. Фактически эти авторы предлагают не решать проблему kT , а просто снять её, приняв большие значения τ за данность. Такие большие времена релаксации магнитных моментов магниторецепторов, если они будут подтверждены, действительно позволяют обсуждать гелиобиологические корреляции в терминах прямого действия вариаций магнитного поля.

Из сопоставления (1), например, с данными [65] тоже следует большое время τ . Однако авторы настоящей статьи не настаивают на реальности таких состояний, поскольку видят возможность сверхчувствительности в рамках более умеренных предположений.

Можно заметить, что проблема kT в форме приведённого выше неравенства не включает в себя важнейшую переменную — время, что расходится с обычной моделью детектирования слабого зашумлённого сигнала. Это обстоятельство указывает на ещё одну перспективу решения проблемы магнитной сверхчувствительности, связанную с поиском таких, внешних по отношению к первичной мишени, биофизических структур или характеристик организма, в которых малые изменения могут накапливаться до уровня, различимого биологическими дискриминаторами.

Наиболее релевантны именно гелиобиологической проблематике несколько вариантов действия предлагаемого общего и других механизмов магниторецепции — они специфичны для режима $h \ll H$ по отношению к случаю $h = 0$.

Интересна возможность, учитывающая собственные молекулярные вращения мишени. Они возникают, если, например, мишень связана с рибонуклеиновой цепью, вращающейся во время синтеза белков. В [66] рассмотрена модель, отличная от обсуждённой выше только тем, что в магнитном поле вращается не магнитный момент, а квантовые фазы, или плотность состояния мишени. Показано, что амплитудная зависимость вероятности биофизических событий близка к функции $J_1^2[h(H - A/\gamma)^{-1}]$, где A — скорость собственного вращения мишени. Максимальный магнитный эффект здесь достигается при $h \sim H - A/\gamma$. Если скорость A близка к γH , то для переменных полей с

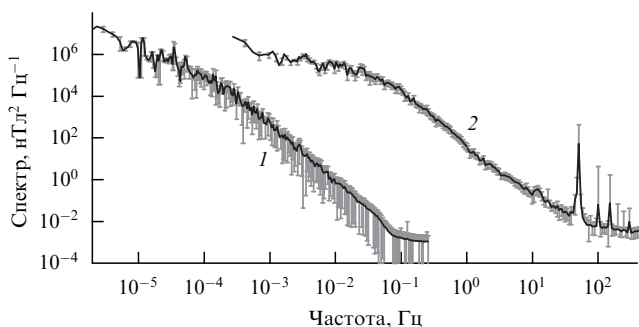


Рис. 6. Спектральная плотность мощности вариаций естественных (1) и техногенных (городских) (2) источников магнитного шума [46].

амплитудой $h \ll H$ возможен эффект, аналогичный эффекту магнитного вакуума. В гипомагнитном поле эффект исчезает с возрастанием H , в рассматриваемом случае — с возрастанием h . Однако непосредственно этот механизм неприменим, поскольку даже для вращений аминокислот с относительно большой массой M и $\gamma \sim e/(Mc)$ эффективные частоты $\Omega/(2\pi)$ имеют порядок 10 Гц, далёкий от спектра геомагнитных бурь (рис. 6). Необходима разработка моделей, учитывающих квазистатистический и случайный характер этих возмущений.

Рецепция магнитных полей порядка нескольких десятков нТл рассматривается и в рамках немолекулярного механизма [67], в котором магнитная наночастица испытывает стохастические вращения в двумном потенциале, создаваемом нитями цитоскелета. Показано, что магнитное поле может менять высоту барьера. Вычислен уровень изменений магнитного поля, порядка 100–200 нТл, которые вследствие экспоненциальной зависимости вероятности переходов наночастицы от высоты барьера могли бы влиять на частоту переходов условно-стандартной наночастицы и тем самым вызывать биологическую реакцию.

Трудна для комментария проблема, связанная с несопоставимостью амплитуды геомагнитных вариаций, возможно, детектируемых организмами, и уровня городского магнитного шума, который намного выше (см. рис. 6). Прямое биологическое действие городского электромагнитного шума следует, по-видимому, считать доказанным [45]. На наш взгляд, целесообразно исходить из того факта, что спектры городского магнитного шума и геомагнитного шума заметно, на два-три порядка, смещены относительно друг друга. Магнитный шум в низкочастотной области в основном определяется геомагнитной возмущённостью, в то время как городской шум является более высокочастотным. Как организм обрабатывает сигналы магнитных шумов?

В общей картине возбуждения магнитного биологического эффекта различают несколько стадий или уровней. Изменение состояния первичной биофизической мишени вызывает изменения концентраций биохимических интермедиатов, которые затем влекут за собой изменения на уровне систем и далее на уровне поведения целостного организма.

Допустим, в системе магниторецепции организма, на пути передачи сигнала магнитного поля, имеется некий интегратор с постоянной времени интегрирования порядка времени развития магнитной бури — от нескольких часов до суток. На выходе такого интегратора сигнал городского шума будет существенно ослаблен, в то время как интеграл от сигнала геомагнитного шума, наоборот, приобретёт значительную величину. Есть ли в организме подходящий интегратор? Похоже, что концентрации разнообразных

сигнализаторов и регуляторов с малой скоростью биосинтеза и распада изменяются довольно медленно, и биохимические процессы как раз являются такими интеграторами, в которых может усредняться и накапливаться действие слабых факторов.

Остаётся ещё одна трудность: каким образом происходит селекция слабых хронически действующих магнитных сигналов на фоне сильных и быстрых сигналов? Здесь может вступать в дело рассмотренная выше нелинейная связь динамики магнитных моментов с биофизическими событиями следующего уровня, приводящая к зависимостям типа $J_1^2(x)$: эффект является максимальным при $x \sim 1$ и убывает с дальнейшим возрастанием и усреднением x .

4. Заключение

Совокупность современных данных гелиобиологии позволяет говорить о том, что биологическое действие весьма слабых переменных магнитных полей космического происхождения является реальностью. Чувствительность к магнитным полям в несколько десятков нТл и большим наблюдается также в ряде других дисциплин, например при исследованиях магнитной навигации животных. Вместе с тем первичная мишень, "приёмник" магнитных полей в организмах, до сих пор точно не определена, все предложенные механизмы остаются гипотезами. Магнитный эффект зависит не только от параметров внешнего поля и физического окружения, но и от неопределённого множества биохимических и физиологических условий и, следовательно, является малопредсказуемым и трудно воспроизводимым, в основном наблюдаемые реакции не превышают 10–15 %.

На наш взгляд, прямой путь к решению данных проблем — проведение широких междисциплинарных исследований биологических и медицинских эффектов магнитного вакуума с контролируемой "глубиной". Это не только дало бы значительный объём физической информации о микроскопических мишенях магнитного поля в биологических клетках, но и позволило бы снизить риски, связанные с пребыванием организма в гипомагнитных условиях, например в дальнем космосе.

В настоящее время такие эксперименты осуществимы на базе разработанных в Институте общей физики имени А.М. Прохорова РАН систем магнитной экспозиции, установленных в одном из клинических центров Москвы (рис. 7). Система магнитной экспозиции "Фарадей" позволяет записывать и воспроизводить природные магнитные бури, а также магнитные вариации заданной формы. Система "Арфа", позволяющая ослабить внешнее поле на два порядка, предназначена для изучения эффектов магнитного вакуума.

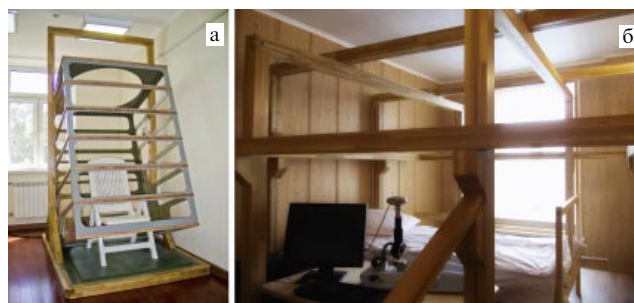


Рис. 7. Системы магнитной экспозиции "Арфа" (а) и "Фарадей" (б) в Научном клиническом центре ОАО РЖД (Москва).

Список литературы

1. Чижевский А Л *Солнечный пульс жизни* (М.: Айрис-Пресс, 2015)
2. Зеленый Л М, Веселовский И С (Ред.) *Плазменная гелиогеофизика Т. 2* (М.: Физматлит, 2008) с. 175
3. Цветков Ю П и др. *Геомагнетизм и аэрономия* **38** (2) 74 (1998); Tsvetkov Yu P et al. *Geomagn. Aeron.* **38** 192 (1998)
4. Комаров Ф И и др. *Вестн. Акад. мед. наук* (11) 37 (1994)
5. Breus T K et al. *Chronobiologia* **21** 165 (1994)
6. Halberg F et al. *International Womb-to-Tomb Chronome Initiative Group: Chronobiology in Space, Keynote, 37th Ann. Mtg. Japan Soc. for Aerospace and Environmental Medicine, Nagoya, Japan, November 8–9, 1991* (Seminar Series, No. 1) (Minneapolis: Univ. of Minnesota, 1991)
7. Watanabe Y et al., in *Noninvasive Methods of Cardiology 2014* (Eds T Kenner et al.) (Brno, Czech Republic: Masaryk Univ., 2014) p. 59; <http://www.med.muni.cz/dokumenty/pdf/noninvasive-methods-in-cardiology-2014.pdf>
8. Cornélissen G et al. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **64** 707 (2002)
9. Виллорези Дж и др. *Биофизика* **40** 983 (1995); Villorezi G et al. *Biophys.* **40** 993 (1995); *Phys. Medica* **10** 79 (1994)
10. Митрофанова Т А и др., в сб. *Космическая погода: ее влияние на человека и биологические объекты. Материалы Международ. конф., 17–18 февраля 2005 г.* (Под ред. О Ю Атькова, Ю И Гурфинкеля) (М.: РепроЦЕНТР, 2006) с. 55
11. Dimitrova S *Adv. Space Res.* **37** 1251 (2006)
12. Stoupe E, Abramson E, Israelevich P J. *Basic Clin. Physiol. Pharmacol.* **22** (4) 91 (2011)
13. Zeng W et al. *Biol. Rhythm Res.* **45** 579 (2014)
14. Зенченко Т А и др. *Клиническая медицина* (1) 31 (2007)
15. Breus T K, Baevskii R M, Chernikova A G J. *Biomed. Sci. Eng.* **5** 341 (2012)
16. Palmer S J, Rycroft M J, Cermack M *Surv. Geophys.* **27** 557 (2006)
17. Зенченко Т А, в сб. *Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле. Труды Международ. конф., 4–8 июня 2012, Москва, Россия Т. 2* (Под ред. А И Григорьева, Л М Зелёного) (М.: ИКИ РАН, 2013) с. 633; <http://www.iki.rssi.ru/books/2013breus2.pdf>
18. Чазова И Е, Беленков Ю Н *Системные гипертензии* (6) 2 (2004); <http://www.consilium-medicum.com/magazines/magazines/special/hypertens/article/10299>
19. Савенков М П *Consilium Medicum* **7** (5) 360 (2005)
20. Савенков М П, Иванов С Н, Сафонова Т Е *Трудный пациент* **5** (3) 17 (2007)
21. Schechter A N, Gladwin M T N. *Engl. J. Med.* **348** 1483 (2003)
22. Рапопорт С И и др. *Биофизика* **43** 632 (1998); Rapoport S I et al. *Biophys.* **43** 596 (1998)
23. Cornélissen G et al. *Scripta Med.* **83** 16 (2010)
24. Breus T K, Boiko E R, Zenchenko T A *Life Sci. Space Res.* **4** 17 (2015)
25. Девятков Н Д *УФН* **110** 453 (1973); Devyatkov N D *Sov. Phys. Usp.* **16** 568 (1974)
26. Moulder J E *Radiat. Res.* **153** 613 (2000)
27. Johnsen S, Lohmann K J *Nature Rev. Neurosci.* **6** 703 (2005)
28. Wiltschko W, Wiltschko R *Science* **176** 62 (1972)
29. Ritz T et al. *Biophys. J.* **96** 3451 (2009)
30. Wiltschko R, Wiltschko W *Magnetic Orientation in Animals* (Zoophysiology, Vol. 33) (Berlin: Springer, 1995)
31. Fischer J H et al. *Animal Behaviour* **62** (1) 1 (2001)
32. Lohmann J et al. *Nature* **428** 909 (2004)
33. Phillips J B, Muheim R, Jorge P E J. *Exp. Biol.* **213** 3247 (2010)
34. Kishkinev D et al. *PLoS ONE* **8** (6) e65847 (2013)
35. Holland R A et al. *PLoS ONE* **3** (2) e1676 (2008)
36. Holland R A *J. R. Soc. Interface* **7** 1617 (2010)
37. Wu L-Q, Dickman J D *Science* **336** 1054 (2012)
38. Ritz T, Adem S, Schulten K *Biophys. J.* **78** 707 (2000)
39. Rodgers C T, Hore P J *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **106** 353 (2009)
40. Binhi V N *Bioelectromagnetics* **27** 58 (2006)
41. Henshaw D L, Reiter R J *Bioelectromagnetics* **26** (Suppl. 7) S86 (2005)
42. Alberto D et al. *Electromagn. Biol. Med.* **27** (1) 25 (2008)
43. Hore P J *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **109** 1357 (2012)
44. Prato F S *Bioelectromagnetics* **35** 333 (2015)
45. Engels S et al. *Nature* **509** 353 (2014)
46. Бинги В Н *Принципы электромагнитной биофизики* (М.: Физматлит, 2011)
47. Rössli M (Ed.) *Epidemiology of Electromagnetic Fields* (Boca Raton: CRC Press, Taylor and Francis Group, 2014)
48. Сподобаев Ю М, Кубанов В П *Основы электромагнитной экологии* (М.: Радио и связь, 2000)
49. IEEE Standards C95.3.1 TM-2010 (New York: IEEE, 2010); <http://standards.ieee.org/about/get/>
50. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans* Vol. 80 *NonIonizing Radiation* Pt. 1 (Lyon: IARC Press, 2002)
51. "IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans", Press Release No. 208, 31 May 2011 (Lyon: IARC Press, 2011)
52. Yeagley H L J. *Appl. Phys.* **22** 746 (1951)
53. Blackman C F, Benane S G, House D E *FASEB J.* **7** 801 (1993)
54. Binhi V N *Int. J. Rad. Biol.* **84** 569 (2008)
55. Афанасьева М С и др. *Успехи химии* **76** 651 (2007); Afanasyeva M S et al. *Russ. Chem. Rev.* **76** 599 (2007)
56. Бучаченко А Л *Успехи химии* **83** 1 (2014); Buchachenko A L *Russ. Chem. Rev.* **83** 1 (2014)
57. Binhi V N *Electro Magnetobiol.* **16** 203 (1997)
58. Бинги В Н, Савин А В *УФН* **173** 265 (2003); Binhi V N, Savin A V *Phys. Usp.* **46** 259 (2003)
59. Tikhonov V I, Volkov A A *Science* **296** 2363 (2002)
60. Binhi V N, Rubin A V *Electromagn. Biol. Med.* **26** 45 (2007)
61. Першин С М *Биофизика* **58** 723 (2013); Pershin S M *Biophysics* **58** 723 (2013)
62. Рыжкина И С и др. *Докл. РАН* **428** 487 (2009); Ryzhkina I S et al. *Dokl. Phys. Chem.* **428** 196 (2009)
63. Бинги В Н *Биофизика* **61** 201 (2016); Binhi V N *Biophysics* **61** 170 (2016)
64. Gauger E M et al. *Phys. Rev. Lett.* **106** 040503 (2011)
65. Богатина Н И, Шейкина Н В, Кордюм Е Л *Вісн. Харк. нац. ун-ту. Біофіз. вісн.* (17) 78 (2006)
66. Binhi V N *Bioelectromagnetics* **21** 34 (2000)
67. Binhi V N, Chernavskii D S *Europhys. Lett.* **70** 850 (2005)

Magnetic factor of the solar terrestrial relations and its impact on the human body: physical problems and prospects for research

T.K. Breus, A.A. Petrukovich. *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation. E-mail: breus36@mail.ru, apetruko@iki.rssi.ru*

V.N. Binhi. *Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, ul. Vavilova 38, 119991 Moscow, Russian Federation. E-mail: binhi@kapella.gpi.ru*

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Biology, Leninskie gory 1, str. 12, 119991 Moscow, Russian Federation

The body of heliobiological evidence suggests that very weak variable magnetic fields due to solar- and geomagnetic-activities do have a biological effect. Geomagnetic disturbances can cause a non-specific reaction in the human body — a kind of general adaptation syndrome, which occurs due to any external stress factor. Also specific reactions can develop. One of the reasons discussed for the similarity between the biological and heliogeophysical rhythms is that geomagnetic variations have a direct influence on organisms, although exact magnetoreception mechanisms are not yet clear. The paper briefly reviews the current state of empirical and theoretical work on this fundamental multidisciplinary problem.

Keywords: geomagnetic disturbances, biological and geomagnetic rhythmicity, mechanisms of magnetoreception, magnetobiology

PACS numbers: **87.10.** – e, 87.18.Yt, **87.50.** – a, 94.30.Va

Bibliography — 67 references

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **186** (5) 568–576 (2016)

DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037693

Received 20 January 2016

Physics – Uspekhi **59** (5) (2016)