

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Т.К. Бреус

BIOLOGICAL EFFECTS OF SOLAR ACTIVITY

T.K. Breus

В работе изложены краткая история и современные представления об исследованиях воздействия слабых и сверхслабых электромагнитных полей, генерированных солнечной активностью в магнитосфере Земли на живые организмы, включая человека. Обсуждаются современные экспериментальные и статистические исследования, а также возможные механизмы магнитобиологии.

A short historical overview of problem together with modern understanding of biological effect week and extra week electromagnetic fields generated by the solar activity in the Earth's magnetosphere is presented. Experimental, statistical and observational evidences of these effects including effects on human population is under discussion as well as modern mechanisms of their action in magnetobiology.

1. Формулировка проблемы и ее краткая история

Как следует из определения проблемы – это междисциплинарная область знаний, поскольку она объединяет как исследования геофизических факторов, процессов, связанных с явлениями на Солнце, и возможных физических механизмов, объясняющих их биологическое действие, так и биологическую или биохимическую трансформацию этих механизмов в физиологические проявления живых систем на всех их уровнях, от клеточного до популяционного. В 70-х гг. прошлого века эта область исследований получила название гелиобиологии.

1.1. Первые шаги гелиобиологии

Еще в XIX в. шведский ученый Аррениус осознал, что влияние Солнца на биосферу реализуется через физический агент электромагнитной природы.

В 30–50 гг. XX в. Чижевским [1, 2] были обобщены и проанализированы работы по этой проблеме его современников и сформулирована принципиальная концепция космического влияния (прежде всего, Солнца) на биосферу. Им же были предложены эффективные статистические методы анализа (например, использован метод, который применяется и в настоящее время, и называется теперь методом наложенных эпох) и проведена обработка и интерпретация собственного обширного фактического материала. Работы Чижевского получили широкое мировое признание, были переведены на многие иностранные языки. В 1939 г. Чижевский был заочно избран почетным президентом 1-го Международного биофизического конгресса в Нью-Йорке и представлен группой выдающихся ученых на соискание Нобелевской премии. В силу известных обстоятельств ему пришлось отказаться от премии, однако, находясь в ссылке, А.Л. Чижевский продолжал свои исследования и сделал множество оригинальных работ в медицине и биологии. Его по праву считают основоположником гелиобиологии. Разумеется, во времена Чижевского наука не располагала мощными методами исследования Солнца, понятиями нелинейности биологических систем, а также современными методами статистики и необходимым лабораторным оборудованием. Этим объясняется некоторая наивность представлений Чижевского о биотропных факторах солнечной активности.

1.2. Новая эпоха в истории гелиобиологии

Открытие в 60-х гг. солнечного ветра и магнитосферы Земли привело к появлению новых данных о среде, в которой существует биосфера. Актуальным стало исследование вариаций слабых естественных электромагнитных полей (ЭМП), связанных с воздействием солнечного ветра (СВ) и межпланетного магнитного поля (ММП) на магнитосферу Земли. После открытий космической эпохи исследования по гелиобиологии активно продолжались и был накоплен обширный материал, свидетельствующий о существовании отклика биологических систем на воздействие слабых естественных ЭМП. Результаты этих многочисленных исследований подробно описаны в обзорных монографиях того периода [3–6]. Всерьез обсуждалась возможность открытия отделения по гелиобиологии в Академии наук.

1.3. Скептицизм и его причины

Вскоре, однако, возник серьезный скептицизм по отношению к возможным биологическим эффектам ЭМП магнитосферного происхождения. В основном он был связан с энергетическим парадоксом – малой амплитудой естественных ЭМП от десятых долей до нескольких сотен нанотесла. Эта величина существенно меньше величины электромагнитного шума производственной и бытовой природы. Более того, она примерно на десять порядков меньше характерной энергии биохимических реакций [7, 8], имеющих тепловой масштаб (kT).

Следует отметить также, что лабораторные эксперименты со слабыми низкочастотными ЭМП были плохо воспроизводимы. Они, однако, показали, что биологические эффекты появляются не на всех частотах и зависят от частоты их низкочастотной модуляции, что свидетельствует о нетепловой природе этих эффектов [9].

Проблема биологических реакций и механизмов действия слабых ЭМП (менее 1 мТл) вышла за рамки гелиобиологии в связи с экологическими причинами. Электромагнитное загрязнение среды обитания в результате производственной и бытовой деятельности человека, а также обнаружение потенциальной опасности для здоровья слабых низкочастотных полей нетепловой интенсивности резко повысило интерес к этой области исследований.

Вместе с тем физический, биологический и биохимический механизмы их действия остаются не вполне понятными и вызывают резкие споры и в настоящее время вплоть до полного отрицания.

2. Развитие дисциплин, сыгравших принципиально важную роль в понимании проблемы

В начале 90-х гг. заметному прогрессу в понимании проблем гелиобиологии и магнитобиологии способствовали успехи теории индуцированных шумом переходов, и ее практических приложений к биологии [10–12]. Согласно этой теории, биологические объекты являются сложными открытыми нелинейными системами, для которых эффекты влияния слабого внешнего шума являются в противоположность интуитивным представлениям фундаментальными. Внешний шум может играть активную роль в процессах самоорганизации этих систем. Артур Уинфри, известный американский специалист в области математической биологии, исследуя биологические ритмы, продемонстрировал [12], как при определенных условиях, под влиянием весьма слабых возмущений, некоторые биологические «осцилляторы», в том числе пульсирующие клетки мозга и сердца, спонтанно становятся синхронизованными и начинают биться в унисон. Он также показал, каким образом даже наиболее стабильные из подобных ритмов могут внезапно коллапсировать и при этом возникают хаотические движения, которые иногда приводят к фатальным последствиям. В сущности, подобные явления возникают в точке сингулярности фазы, т. е. в случае, когда фаза процесса не может быть определена однозначно. У нас в стране динамическим хаосом в медицине и его последствиями занимается на современном уровне, например, группа А.Ю. Лоскутова из МГУ [13]

Очевидно, что эти представления могли в значительной степени разрешить проблему энергетического парадокса воздействия слабых природных ЭМП уровня шума на биологические системы. Очевидно также, что неоднозначность реакции сложных нелинейных систем на слабые воздействия является их характерным свойством и зависит не только от характера воздействующего фактора, но и от состояния самой системы. Это могло приводить к упоминавшимся выше различиям в реакциях биологических систем на слабые воздействия и к плохой воспроизводимости лабораторных экспериментов.

Другими дисциплинами, важными для разработки новых плодотворных концепций в гелиобиологии, стали хронобиология (или биоритмология, как ее называют в нашей стране) и хрономедицина. Как науки они занимаются вопросами временной организации биологических объектов, а также исследованием процесса интеграции в генетическую структуру живых организмов ритмов внешних датчиков. Именно это и выдвинуло их на передний план в понимании рассматриваемой проблемы.

3. Биологические причины существования эффектов солнечной активности

В середине 80-х гг. были проведены экспертные исследования по поиску биологических эффектов

солнечной активности с учетом успехов упомянутых выше дисциплин. Они осуществлялись с помощью спектральных и спектрально-временных методов, ранее не применявшихся в гелиобиологии, а также с использованием большого банка медицинских данных популяционного характера (около 6 млн. измерений). Были проведены и целенаправленные клинические и лабораторные эксперименты. Эти исследования позволили подтвердить достоверность биологических эффектов солнечной активности и выдвинуть концепцию биологических причин их существования [14–18].

Было показано, что ритмы естественных ЭМП «завели» когда-то на ранних стадиях эволюции «биологические» часы. Можно провести аналогию с хорошо известным происхождением суточных (циркадных) биологических ритмов, которые возникли под воздействием ритмов другого фактора солнечной активности – волнового излучения Солнца (т. е. освещенности и соответственно температуры), связанных с суточным вращением Земли. Сформировавшиеся под влиянием гелиогеофизического датчика времени эндогенные ритмы устойчивы, так как адаптационная система поддерживает организм в устойчивом состоянии. Однако вследствие резких аperiодических изменений, т. е. сбоя ритмов этого внешнего датчика времени (например, геомагнитных возмущений), должна происходить десинхронизация внутренних биологических ритмов как одно из проявлений общего адаптационного синдрома. Подобный адаптационный синдром наблюдается, например, при десинхронизации фаз суточных ритмов во время трансконтинентальных перелетов.

Необратимая реакция живых организмов на сбой ритмов датчика времени, однако, может возникать в основном тогда, когда биологическая система находится в состоянии неустойчивости, т. е. имеется патология адаптационной системы (заболевание), или адаптационная система не сформировалась, как у детей, или перенапряжена вследствие воздействия другого стрессового фактора (группы риска).

3.1. Временная структура гелиогеофизических ритмов

Гелиогеофизические ритмы с периодами, соответствующими периоду собственного вращения Солнца, стали известны еще с начала космических исследований. В частности, приходы к Земле рекуррентных высокоскоростных потоков солнечного ветра с примерно 27-дневной периодичностью и их роль в формировании геомагнитной активности широко обсуждались в литературе.

На рис. 1 показаны данные измерения солнечного ветра вблизи орбиты Земли на различных космических аппаратах на протяжении нескольких оборотов Солнца [19]. Отчетливо заметны «волны» скорости протяженностью около 7 дней.

Очевидно, что собственное вращение Солнца (период около 28 дней и его гармоника – около 14, 9, 7 и т. д. дней) является основной причиной формирования наблюдающихся ритмов.

Было показано, что ритмические компоненты более выражены в вариациях магнитных полей Солнца, чем в скоростях солнечного ветра [19, 20] по-видимому,

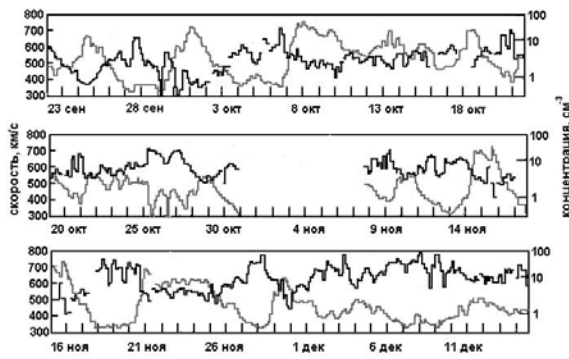


Рис. 1. Околонедельные «волны» скорости и концентрации солнечного ветра, измеренные на искусственных спутниках Земли [19].

из-за того, что на последние оказывают влияние взаимодействия высокоскоростных потоков с медленным солнечным ветром в межпланетном пространстве, в то время как полярность магнитных полей в межпланетном пространстве остается неизменной.

Очевидно, что периоды 9 дней, 6.75 и 5.4 дня являются также характерными периодами в спектре K_p -индекса, характеризующего геомагнитную активность (рис. 2).

3.2. Временная структура биологических ритмов

До недавнего времени считалось, что суточный ритм является ведущим в иерархии биологических ритмов живых организмов. Предполагалось, что суточные эндогенные ритмы возникли на ранних стадиях существования живых организмов под влиянием суточных ритмов температуры и освещенности, связанных с вращением Земли, а затем закрепились эволюционно на всех уровнях сложных биологических систем, от клеточного до организменного.

Инфраничные (с периодом <28 дней и >28 часов) биологические ритмы, по-видимому, были известны еще в античные времена. В работах Халберга было обнаружено, что они имеют свободное течение и их период слегка отличается от точного периода социальной недели (7 дней [21–23]). Как известно, ритмы кризисных дней в случае тяжелых заболеваний или отторжения трансплантатов после операций являются свободно текущими ритмами, поскольку синхронизируются с началом заболевания или днем проведения операции, но не с социальной неделей (рис. 3). Это означает, что эти ритмы, сходные с ритмами гелиогеомагнитных факторов, встроены во временную структуру организма и являются эндогенными биологическими ритмами.

Следует отметить, что в формировании эндогенной ритмики с периодами около 27–28 дней и их гармониками могли играть важную роль и другие факторы – например, слабые гравитационные ритмы, порождаемые воздействием Луны и также имеющие около 27-дневную периодичность. Стабильные лунные ритмы, интегрированные во временную структуру живых объектов, составили, по-видимому, фоновые эндогенные колебания, на которые накладывались ритмы естественных ЭМП сходных периодов, менее устойчивые и требующие адаптации.

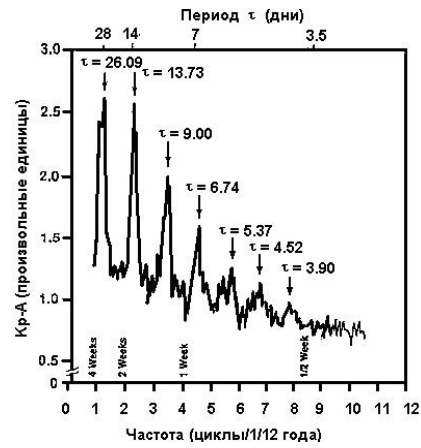


Рис. 2. Спектр вариаций K_p -индекса геомагнитной активности за 1932–1990 гг. [22].

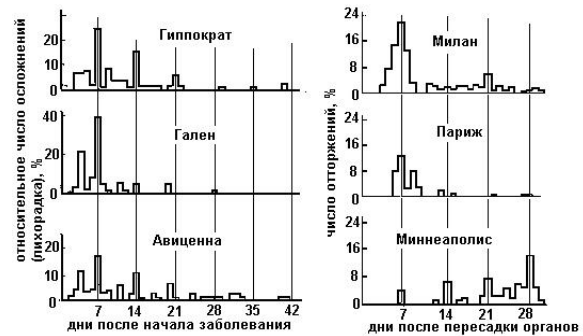


Рис. 3. Спектры обострений после начала заболевания лихорадкой, построенные по записям врачей античного периода (слева) и отторжений трансплантатов после операций по пересадке почек и сердца, рассчитанные по протоколам клиник в Париже, Милане и Миннеаполисе (справа).

3.3. Адаптационный синдром как биологическая причина эффектов слабых естественных ЭМП

Большую часть материала, рассмотренного в этом разделе, можно найти в книге [16] и литературе, представленной в ссылках к этой книге.

Исследования показали, что имеются высокие коэффициенты спектральной кросскорреляции гелиогеофизических и биологических ритмов; происходит синхронное изменение амплитуды вариаций околонедельных гелиогеофизических и биологических ритмов на протяжении цикла солнечной активности. Синхронность вариаций в цикле солнечной активности является ключевым аргументом их связи.

Предполагалось в соответствии с выдвинутой концепцией об адаптационных причинах формирования биологической ритмики, что должны существовать группы риска, в которых из-за неустойчивого состояния системы она должна проявлять наибольшую чувствительность к возмущениям (сбоям ритмов) естественных ЭМП.

С использованием банка данных вызовов скорой помощи в Москве за 1979–1981 гг. по поводу 10 различных заболеваний и травм (6 млн. показателей) было показано, что одной из основных мишеней для гелиогеомагнитных возмущений является сердечно-сосудистая система. Достоверное возрастание числа вызовов скорой помощи происходило только в группе больных инфарктом миокарда (на 13 % из

80 000) во время сильных планетарных магнитных бурь с индексом AA > 60.

В этой первой группе риска во время геомагнитных возмущений выявлены различные функциональные расстройства сердечного ритма у 85 % больных (172 чел.), перенесших инфаркт миокарда и страдающих стенокардией.

У 60 % здоровых людей (58 чел.) при нормальном режиме жизни во время геомагнитного возмущения наблюдались слабые функциональные расстройства сердечного ритма, однако они были выражены существенно слабее, чем у больных, и не требовали специальной терапии.

Во время геомагнитного возмущения примерно у 80 % больных и 30 % здоровых людей возрастала вязкость крови, происходило замедление капиллярного кровотока и наблюдалась агрегация эритроцитов. У здоровых людей и больных молодого возраста эти эффекты быстро проходили после окончания возмущения.

Все результаты, полученные в первой группе риска свидетельствовали об активации симпатического отдела вегетативной нервной системы, характерной для адаптационного синдрома при воздействии внешних или внутренних факторов.

В другой группе риска, у космонавтов (49 чел.), адаптационная система которых перенапряжена действием других факторов, связанных с полетом, например, невесомости, во время геомагнитного возмущения также достоверно наблюдались реакции типа адаптационного синдрома – изменялась частота сердечных сокращений, происходила опасная стабилизация сердечного ритма, возникла аритмия, изменялся сосудистый тонус (рис. 4). Особенности этих реакций зависели от исходного состояния организма космонавтов – длительности полета и условий посадки на Землю [16].

4. Биотропные факторы воздействия слабых ЭМП, связанных с солнечной активностью

Геомагнитные возмущения имеют различные характеристики по интенсивности, спектральному составу и т. д. Какая же из характеристик магнитной бури является биотропным агентом?

В лабораторных и эпидемиологических исследованиях показано, что нахождение людей в электромагнитных полях низкой и очень низкой частоты сопровождается изменением вариабельности частоты сердечных сокращений, т. е. вызывает стабилизацию сердечного ритма, что может приводить к внезапной смерти от аритмии и к развитию инфаркта миокарда [25, 26]. В связи с тем, что сердце является мишенью для воздействий ЭМП (см. упомянутые выше работы), было высказано предположение, что полоса частот 0.5–2 Гц (геомагнитные пульсации Pc1, совпадающие с основными ритмами сердца), а также полоса частот 6–16 Гц в диапазоне частот альфа- и бета-ритмов головного мозга (шумановские резонансы), и наконец, пульсации типа Pc3 с периодами 20–40 с (такие квазипериоды были также замечены в ритмах сердечной деятельности) могут оказаться биотропными агентами магнитных бурь.

Первые исследования роли Pc1-пульсаций в ка-

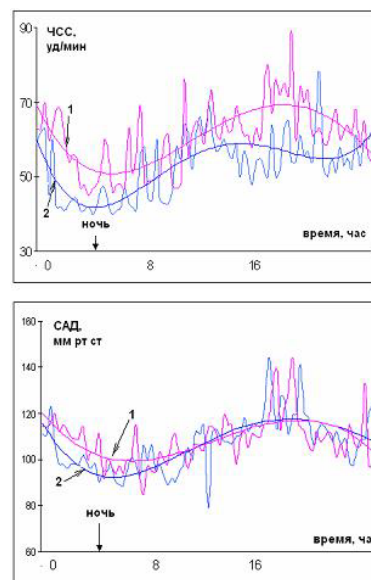


Рис. 4. Пример записи суточной динамики частоты сердечных сокращений (ЧСС) и систолического артериального давления (САД) у космонавта после воздействия геомагнитной бури на 4–6 месяцах полета на орбитальной станции МКС. Линия 1 – первые сутки сразу же после магнитной бури; линия 2 – спокойная геомагнитная обстановка (с Баевским Р.М. и др., ИМБП РАН).

честве такого агента, проведенные в конце 2004 г., дали обнадеживающие результаты [26].

В 70 % случаев дней с аномально большим числом инфарктов миокарда в Москве отмечалось появление геомагнитных пульсаций типа Pc1. Вероятность появления таких дней вдвое превышает вероятность их случайного совпадения.

Обнаружена корреляция сезонного хода смертности от инфаркта миокарда за 25 лет и длительности геомагнитных пульсаций типа Pc1 (рис. 5). Таким образом, ритмы гелиогеомагнитных факторов в диапазоне ритмов сердца могут оказаться наиболее биотропным агентом из всего спектра геомагнитных колебаний, связанных с солнечной активностью.

5. Возможные физические механизмы воздействия слабых переменных ЭМП в микроволновом диапазоне на биологические объекты

В формировании магнитобиологического эффекта участвуют процессы разных уровней организации живых систем, начиная с физического и оканчивая, как было показано выше, адаптационными биологическими процессами. Поэтому специалисты разных областей относятся к проблеме поиска механизмов по-разному. Медики ищут органы и физиологические процессы, чувствительные к ЭМП, биологи исследуют клеточные и внутриклеточные структуры, формирующие отклик биологических систем на ЭМП, биохимики ищут биохимические реакции, которые могли бы зависеть от ЭМП, биофизики пытаются выделить магниточувствительные молекулярные структуры.

Однако первичные процессы взаимодействия магнитного поля с электронами, атомами и молекулами биологических объектов представляют собой физические процессы. Заряженные частицы живой

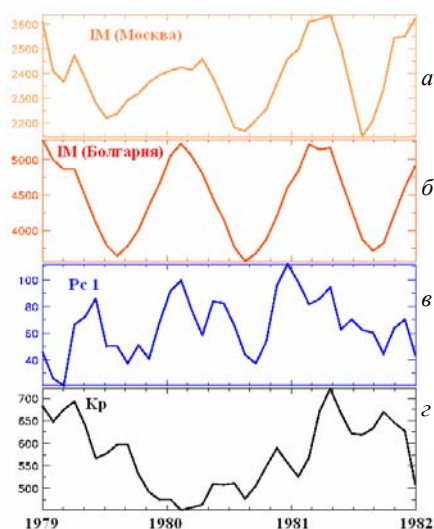


Рис. 5. Вызовы скорой помощи по Москве по поводу инфарктов (а), смертность от инфаркта миокарда в Болгарии (б), продолжительность Pс1-пульсации (в) и K_p-индекс геомагнитной активности (z) [26].

материи, участвующие в биофизических и биохимических процессах, являются, по-видимому, посредниками в передаче электромагнитных сигналов на следующий биохимический уровень. Регуляция активности белков ферментов осуществляется биофизическим механизмом с участием ионов и молекул – посредников, что приводит к смещению процессов метаболизма (обмена веществ). Начиная с этого уровня можно наблюдать действие магнитного поля по изменению концентрации продуктов метаболизма [8].

По-видимому не существует в природе специализированных биологических магниторецепторов, кроме биомангнетитов – кристаллов, способных намагничиваться, обнаруженных у некоторых бактерий, птиц, приматов и у человека вблизи клиновидной кости в черепе и в надпочечниках [28]. Исторически первым предложенным механизмом биологических эффектов ЭМП был вращательный момент таких кристаллов в магнитном поле и связанное с ним давление на соседние ткани. Этот механизм, по-видимому, объясняет «хоминговые» эффекты, обнаруженные у некоторых птиц (ориентация по магнитному полю), однако не решает проблему. Одноклеточные организмы, не содержащие магнетитов, реагируют на ЭМП, их реакция носит сложный нелинейный характер и зависит от параметров поля. Как уже отмечалось, имеется обилие теоретических моделей физических механизмов биологических эффектов слабых ЭМП, которые можно найти в обзоре [8, 29].

В настоящее время появился ряд работ, опирающихся на физический механизм явления стохастического резонанса или стохастической фильтрации [30]. В недавних работах [30] было показано, что стохастический резонанс упомянутых биомангнетиков в цитоскелете может объяснить биологические эффекты слабых ЭМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чижевский А.Л. Физические факторы исторического процесса. Калуга, 1924. 72 с.
2. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973. 350 с.
3. Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А., Макеев В.Б., Владимирский Б.М. Космическая экология. Киев: Наукова Думка, 1985. С. 176.
4. Сидякин В.Г., Темурьянц Н.А., Макеев В.Б., Тишкин О.Г. Чувствительность человека к изменению солнечной активности // Успехи современной биологии. 1983. Т. 96. Вып. 1(4). С. 151–160.
5. Темурьянц Н.А., Макеев В.Б., Тишкин О.Г. Влияние солнечной активности на заболеваемость и смертность от болезней сердечно-сосудистой системы // Сов. мед. 1982. № 10. С. 66–72.
6. Темурьянц Н.А., Тишкин О.Г. Влияние солнечной активности на динамику заболеваемости и смертности населения // Тер. арх. 1985. № 5. С. 150–151.
7. Adair R.K. Constraints on biological effects of weak extremely low-frequency electromagnetic fields // Phys. Rev. 1991. V. A43, N 3. P. 1039–1048.
8. Бинги В.Н., Савин А.В. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы // Успехи физ. наук. Т. 173, № 3. 2003.
9. Леднев В.В., Белова Н.А., Рождественская З.Е., Тирас Х.П. Биоэффекты слабых переменных магнитных полей и биологические предвестники землетрясений // Геофизические процессы и биосфера. 2003. Т. 2, № 1. С. 3–11.
10. Horsthemke W., Lefever R. Noise-induced Transitions. Theory and Applications in Physics, Chemistry and Biology. Springer-Verlag, Berlin-Tokyo, 1984. 395 p.
11. Гласс Л., Мэки М. От часов к хаосу. Ритмы жизни. М.: Мир, 1991.
12. Winfree A.T. The Geometry of Biological Time, Interdisciplinary mathematics. V. 12. Springer, 2001. 777 p.
13. Loskutov A., Rybalko S., Zhuchkova E. Model of cardiac tissue as a conductive system with interacting pacemakers and refractory time // International Journal of Bifurcation and Chaos. 2004. V. 14, N 7. P. 2457–2466.
14. Комаров Ф.И., Рапопорт С.И., Бреус Т.К., Иванова С.В. Солнечно-ионосферные связи биоритмов и некоторые вопросы внутренней медицины: методологические аспекты // Тер. арх., 1985. Т. 57, № 3. С. 149–153.
15. Комаров Ф.И., Бреус Т.К., Рапопорт С.И. и др. Гелиогеофизические факторы и их воздействие на циклические процессы в биосфере // Итоги науки и техники. Сер. Медицинская география. 1989. Т. 18. 175 с.
16. Бреус Т.К., Рапопорт С.И. Магнитные бури – медико-биологические и геофизические аспекты. М.: Советский спорт, 2003. 192 с.
17. Breus T.K., Golyshv S.A., Ivanova S.V., et al. Influence of the interplanetary magnetic field on human health // Solar Terrestrial Energy Program, COSPAR Colloquia Series. V. 5 / Eds. D.N. Baker, V.O. Papitashvili, M.J. Teague. 1994. Pergamon Press. P. 581–605.
18. Breus T., Cornelissen G., Halberg F., Levitin A.E. Temporal associations of life with solar and geophysical activity // Annales Geophysicae. 1995. V. 13. P. 1211–1222.
19. Neugebauer M., Smith E.J., Ruzmaikin A., et al. The solar magnetic field and the solar wind: existence of preferred longitudes // J. Geophys. Res. 2000. V. 105(A2), P. 2315–24.
20. Gilman P.A., Guenther D.B. // Ap. J., 1987. V. 318. P. 904.
21. Scherrer P.H., Wilcox J.M., Svalgaard L., et al. The mean magnetic field of the Sun: Observations at Stanford // Solar Phys. 1977. V. 54. P. 353–361.
22. Комаров Ф.И., Бреус Т.К., Рапопорт С.И. и др. Медико-биологические эффекты солнечной активности // Вестник Академии медицинских наук. 1994. Вып. 11. С. 37–50.
23. Zerubavel E. The Seven Day Circle: The History and Meaning of the Week. N. Y.: Free Press. 1985. 206 p.

24. Sastre A., Cole M.R., Graham C. Nocturnal exposure to intermittent 60 Hz magnetic fields alters human cardiac rhythms // *Bioelectromagnetics*. 1998. N. 19. P. 98–106.
25. Savitz D.A., Liao D.P., Sastre A., et al. Magnetic field exposure and cardiovascular disease mortality among electric utility workers // *American Journal of Epidemiology*. 1999. N. 149. P. 135–142.
26. Рапопорт С.И., Бреус Т.К., Клейменова Н.Г., Козырева О.В. Геомагнитные пульсации и инфаркты миокарда // *Тер. архив*. 2006. Т. 78, № 4. С. 56.
27. Kirschvink J.L., Jones D.S., MacFadden B.J., (Eds) *Magnetite Biomineralization and Magnetoreception in Organisms: A new Biomagnetism* (Topics in Geobiology, V. 5, Plenum Press, 1985.
28. Binhi V.N. *Magnetobiology; Underlying Physical problems*. San Diego: Academic Press, 2002.
29. Клемантович Ю.Л. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс? // *Успехи физ. наук*, 1999. т. 169, № 1.
30. Binhi V.N., Chernavskii D.S., Stochastic dynamics of magnetosomes in cytoskeletons // *Europhys. Lett*. 2005. V. 70, N 6. P. 850–856.

Институт космических исследований РАН, Москва