

Физика биологии и медицины

Правильная ссылка на статью:

Каспранский Р.Р., Бинги В.Н., Кошель И.В. Связано ли ослабление магнитного поля в космосе с риском ошибок в деятельности космонавтов? // Физика биологии и медицины. 2024. № 1. DOI: 10.7256/2730-0560.2024.1.71398 EDN: RNPMKV URL: https://nbpublish.com/library_read_article.php?id=71398

Связано ли ослабление магнитного поля в космосе с риском ошибок в деятельности космонавтов?

Каспранский Рустем Рамилевич

кандидат медицинских наук

Заместитель директора по научной работе; ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр космической медицины» ФМБА России

123098, Россия, г. Москва, ул. Гамалеи, 23, корпус 2

✉ kaspranski@mail.ru



Бинги Владимир Николаевич

ORCID: 0000-0003-1341-9591

доктор физико-математических наук

Главный научный сотрудник; ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр космической медицины» ФМБА России

123098, Россия, г. Москва, ул. Гамалеи, 23, корпус 2

✉ vnbm@mail.ru



Кошель Иван Владимирович

доктор медицинских наук

Исполняющий обязанности директора; ФГБУ «Федеральный научно-клинический центр космической медицины» ФМБА России

123098, Россия, г. Москва, ул. Гамалеи, 23, корпус 2

✉ koshel1979@mail.ru



[Статья из рубрики "Медицинская физика"](#)

DOI:

10.7256/2730-0560.2024.1.71398

EDN:

RNPMKV

Дата направления статьи в редакцию:

04-08-2024

Аннотация: Число биомедицинских исследований, в которых наблюдаемые эффекты определяются законами квантовой физики, постоянно растет. К ним относятся дыхание, зрение, обоняние, фотосинтез, мутации и др., объединенные единым названием «квантовая биология». Действие на организмы магнитных полей, – в т.ч. ослабленных по сравнению с геомагнитным полем, – одно из таких направлений. Магнитное поле может действовать только на магнитные моменты, важнейшим представителем которых является электрон. Магнитное поле меняет квантовую динамику электронов в организме, что, в конечном счете, приводит к наблюдаемым реакциям на биохимическом и поведенческом уровнях. Организмы на Земле эволюционировали в геомагнитном поле, – значит, его отсутствие может вызвать нарушения в нормальном функционировании организмов. Действительно, на эту тему имеется более двухсот научных публикаций. На сегодня надежно установлено, что гипомагнитное поле может изменять функционирование организмов от бактерий и грибов до млекопитающих и человека. В дальнем космическом полете и в будущих миссиях на Луну и Марс космонавты будут находиться в условиях гипомагнитного поля, – это меньше естественного геомагнитного поля более чем в сто раз. Такое ослабление магнитного поля сопряжено с дополнительным риском. В настоящем миниобзоре дана начальная информация об уровнях магнитного поля на Земле, в ближнем и дальнем космическом пространстве, а также на поверхности Луны и Марса. Приведены сведения о влиянии гипомагнитного поля на характеристики организма человека и о механизмах такого влияния. Сообщается об особенностях исследований в области магнитобиологии, требующих специальных статистических методов обработки результатов. Обсуждается сложность создания гипомагнитного поля в объемах, достаточных для размещения организма человека. Сформулированы первоочередные задачи в этом сравнительно новом направлении магнитобиологии.

Ключевые слова:

магнитные биологические эффекты, человек, геомагнитное поле, гипомагнитное поле, межпланетное магнитное поле, космос, организм, магнитобиология, механизм радикальных пар, магнитная навигация животных

Введение

Действие слабых магнитных полей (МП) описано во многих монографиях^[1–5]. Установлено, что МП может инициировать разные, в том числе и токсические, явления в организмах^[6].

Хорошо известно, что Земля является собою магнит, т.е. обладает собственным магнитным полем, величина которого около 50 мкТл^[7]. Это поле сравнительно невелико, и поэтому в обычной жизни мы его не замечаем. Однако убедиться в повсеместном присутствии геомагнитного поля (геоМП) можно с помощью компаса или смартфона. Для сравнения приведем уровни МП, нередко встречающиеся в жизни человека. Это поле обычного медицинского томографа, – оно в десятки тысяч раз больше чем геоМП. Напротив, дополнительные МП, действующие на пассажиров электротранспорта в десятки и сотни раз меньше чем геоМП^[8].

Биологические ткани в целом диамагнитны. Их реакция на МП, обусловленная

магнетизмом составляющих ткани атомов и молекул, очень мала. Относительная величина этих эффектов 10^{-6} по порядку величины^[9]. По этой причине полагали в течение долгого времени, что организмы не чувствительны к МП. Хотя отдельные попытки использовать МП в терапии известны более ста лет, лишь сравнительно недавно, около 40–50 лет назад, было надежно установлено, что живые клетки могут реагировать на МП своим поведением, — т.е. присущим для жизни образом^[10]. Эти реакции пропадают вместе с прекращением функционирования клетки как живой системы. Оказывается, таким образом, что МП действует не на молекулы тканей, а на биологические процессы, хотя первичными акцепторами являются магнитные моменты молекул. Явление возникает на молекулярном уровне и является квантовым^[11].

Установлено, что различные организмы, как и организм человека, могут реагировать на мельчайшие изменения МП, составляющие приблизительно одну тысячную часть геоМП. К этим явлениям относятся магнитная навигация животных^[12] и кардиоваскулярные реакции на магнитные бури^[13]. Правда, не всегда удается наблюдать такие эффекты в лабораторных условиях, поскольку они в целом имеют случайный характер уже на молекулярном уровне. Их действие незаметно на фоне действия разных неконтролируемых физико-химических факторов^[14]. Эти явления однако хорошо заметны статистически в масштабных исследованиях — в эпидемиологических исследованиях связи фоновых МП с заболеваемостью^[15,16].

Эффекты, инициированные существенным ослаблением геоМП, — в сто и более раз, — вызывают особый интерес. Такие МП называются гипомагнитными, или гипоМП, (от др.-греч. `ιότα ρίο` — под, внизу). Подавление геоМП в лабораторных условиях сопровождается изменениями биохимических показателей и поведения самых разных организмов: от бактерий и грибов до млекопитающих и человека, см. напр. обзоры^[17–20].

Цель настоящего обзора в том, чтобы дать первоначальное представление о гипоМП, его влиянии на организм человека и молекулярном механизме влияния с акцентом на возможность таких эффектов в дальних космических миссиях.

Гипомагнитное поле

МП в пространстве вокруг Земли определяется, главным образом, собственным геоМП Земли и потоком заряженных частиц от Солнца. В результате их взаимодействия образуется сложная магнитная структура — магнитосфера^[21].

Для грубых оценок МП вне Земли можно воспользоваться идеализацией, согласно которой геоМП представляет собой поле магнитного диполя. Оно снижается по мере удаления от Земли. Так величина МП на Международной космической станции на околосземной орбите на высоте 408 км составляет около 0.8 геоМП, а его направление меняется до противоположного на витке орбиты. На расстояниях от Земли порядка размеров Земли и более геоМП уменьшается быстро, приблизительно обратно пропорционально кубу расстояния, так что на расстояниях более 100 тысяч км геоМП составляет менее 10 нанотесла (нТл). В межпланетном пространстве МП намного слабее геомагнитного, — составляет 2–80 нТл^[22(р. 396)], что на три–четыре порядка меньше приповерхностного геоМП. ГипоМП рассматривают как один из факторов, который в ходе длительных миссий на Луну и Марс может повлиять на здоровье космонавтов и

совершенство выполняемых ими операций^[23].

Сведения о МП Луны получены в результате анализа образцов лунных пород в ходе выполнения программы «Аполлон», а также из магнитометрических данных программ Lunar Prospector и Kaguya^[24]. МП Лунной коры неоднородно; неоднородность достигает величин порядка 1 нТл на градус^[25]. Измерения затруднены магнитными помехами вследствие солнечной радиации. На высоте 30 км над лунной поверхностью магнитная индукция очень мала, в основном порядка 1 нТл с редкими аномалиями, где МП достигает величин около 10 нТл и более. На поверхности Луны, вблизи лунных пород, неоднородных по остаточной намагниченности, МП может достигать локальных значений в несколько сотен нТл. Марсианская МП менее нескольких микротесла. Оно обладает сложной динамической структурой в виде мелко- и крупномасштабных неоднородностей размером от десятков до нескольких тысяч км. В целом МП Марса можно охарактеризовать скорее равномерным распределением локальных магнитных аномалий, в которых абсолютная величина МП может меняться от 1–5 нТл до 20–40 нТл, а в некоторых аномалиях и до 1600 нТл на высоте 100 километров^[26].

В 2017 г. опубликован обзор 137 экспериментальных работ по биологическому действию гипомагнитного поля и возможным молекулярным механизмам такого действия^[17]. Эксперименты были отобраны из около двухсот, доступных на тот момент, — по критериям методологического качества работ. На последующем интервале с 2017 по 2023 гг. появилось еще около 90 публикаций, рис. 1. Интересно их распределение по странам, представителями которых являлись авторы публикаций: Россия – 46, Китай – 28, Северная Америка – 14, Италия – 7, Германия – 3, Великобритания – 2, Еще 9 стран – 9.

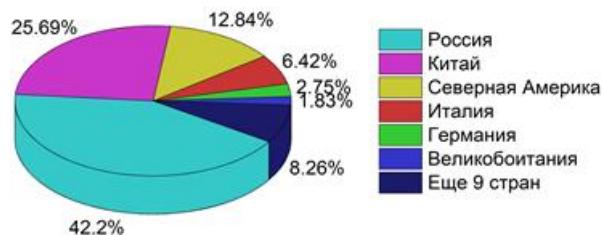


Рис. 1. Распределение публикаций по биологическим эффектам гипомагнитного поля за 2017–2023 гг. по странам.

Fig. 1. The distribution of publications on the biological effects of the hypomagnetic field from 2017 to 2023, by country.

Россия, Китай и Северная Америка являются основными «инвесторами» исследований в этой области. На их долю приходится около 80% работ. Видно, что российские и китайские работы преобладают над североамериканскими. Это объясняется, скорее всего, отсутствием окончательно установленного молекулярного механизма явления и, следовательно, пока еще фундаментальным характером исследований в данной области^[27]. Эти факторы препятствуют практическим применению, в то время как западные страны в первую очередь инвестируют в прикладные разработки.

Однако на сегодня заметно ускорение исследований в области магнитобиологии. За последнее десятилетие только в Китае развернуты три высокотехнологичные лаборатории, где проводят исследования эффектов гипоМП. В этих и других

лабораториях определяют, в частности, гены, вовлеченные в формирование биологического отклика на гипоМП^[28–36]. Уже известно, что одновременное действие, например, радиации и МП обладает синергизмом и не сводится к сумме действий радиации и МП по отдельности^[37–39]. В теоретическом плане успехи не столь велики, но работы в направлении поиска биофизического механизма биологической эффективности гипоМП ведутся и позволяют надеяться на скорое решение этой проблемы^[11]. В результате будет определена первичная биофизическая мишень действия МП на организм. Имеются предположения о том, что ею является клеточный процесс трансляции белков в рибосомах^[40]. Этот сложный многоступенчатый ферментный механизм вовлекает в процесс трансляции образование т.н. спин-коррелированных пар радикалов, которые являются магниточувствительными^[41].

Реакция организма человека на гипоМП

О биологическом действии МП на организм человека известно не много. С одной стороны, имеются многочисленные эпидемиологические исследования, в целом подтверждающие связь здоровья человека с уровнем фоновых электромагнитных полей^[42]. Однако эпидемиологические исследования устанавливают лишь корреляции, не предоставляемые сведений о причинно-следственных отношениях. Лабораторные же исследования действия МП и особенно гипоМП на человека сравнительно малочисленны. Это объясняется тем, что создание МП и гипоМП в объеме, допускающем пребывание человека в течение длительного времени, — сложная техническая задача^[43]. Поэтому в большинстве работ при измерении психофизиологических реакций ограничиваются магнитной экспозицией частей организма^[44]. Имеются лишь несколько публикаций о действии гипоМП на целый организм.

В^[45] реверс направления МП величиной около геоМП приводил к снижению остроты ночного зрения человека: число ошибок распознавания контрастного стимула возрастало в 2–3 раза. В^[46] мышечный трепор у 24 субъектов оценивали в условиях импульсного МП величиной 1 мТл в двойном слепом протоколе реального/имитационного воздействия. Авторы нашли, что эффекты были «небольшими» и что субъекты с трепором высокой амплитуды, по-видимому, более чувствительны к воздействию МП. Интерпретация этих данных затруднена, поскольку авторы не сообщают о скорости переключения МП и, значит, не учитывают эффектов магнитной индукции. В работе^[47] область головы 17 субъектов экспонировали в 60-Гц МП величиной 200 мкТл в виде 2-сек импульсов. Было выявлено статистически значимое возникновение вызванных потенциалов в ЭЭГ измерениях в моменты включения/выключения МП. Очевидно, интерпретация затруднена по той же, что и выше причине. Отклик не на МП, а на индуцированные в мозге вихревые электрические токи не исключен.

Информация о действии именно гипоМП на организм человека скучна, несмотря на явную практическую значимость этого явления. Пребывание в гипоМП влияет на когнитивные функции организма человека. В одной из первых работ этого плана использовали 8-метровую систему прямоугольных катушек. В ее центральной зоне находились четверо испытуемых в течение трех недель. Отклик одной из когнитивных функций на недельное пребывание в гипоМП составил до 30% у трех испытуемых. Изменений физиологических характеристик не наблюдали. Уровень флуктуаций МП, который часто превышает остаточное постоянное МП в зоне экспозиции, не измеряли.

Этим могло объясняться отсутствие физиологических реакций.

В [49] в серии экспериментов голову испытуемых помещали в систему магнитной экспозиции, в которой создавали либо аналог геоМП, либо гипоМП. Измеряли чувствительность зрительной системы к световым вспышкам. Изменение чувствительности до 7% было статистически значимо. В цикле исследований [50] исследовано влияние гипоМП 0.4 мкТл на когнитивные характеристики 40 субъектов. Пребывание в гипоМП в течение 45 мин вызывало статистически достоверные изменения в пяти из восьми измеряемых характеристик при величине эффектов от 1.3 до 6.2%. В гипоМП возрастало число ошибок и увеличивалось время выполнения заданий. Близкое к статистически значимому было изменение площади зрачка в гипоМП [51].

Кубическую двухметровую систему магнитной экспозиции использовали в [52] для экспонирования испытуемых в МП порядка геоМП. Измеряли альфа-ритм ЭЭГ в ответ на вращение МП в горизонтальной плоскости. Отклик наблюдался, когда статическое вертикальное магнитное поле было направлено вниз, но не вверх. Авторы полагают, что это исключает все формы электрической индукции, включая артефакты от электродов. Эффекты имели яркий индивидуальный характер.

Способность к магнитной ориентации 34 мужчин тестировали в 1.9-м системе трех пар катушек Гельмгольца в [53]. Авторы нашли, что испытатели правильно указывали направление на магнитный север в условиях отсутствия сенсорных каналов, — в частности с закрытыми глазами, если их предварительно в течение нескольких минут экспонировали в геоМП. Если предварительное экспонирование осуществлялось в гипоМП, последующая правильная ориентация не достигалась.

В ходе работ по теме «Серена-Магнит» коллективом НИИ космической медицины (теперь ФНКЦ космической медицины ФМБА) совместно с Научно-клиническим центром ОАО РЖД проведены пилотные исследования влияния сочетанного воздействия гипогравитации и измененного магнитного поля на физиологические сдвиги в организме человека [54]. Исследования проводили при помощи систем магнитной экспозиции «Арфа» и «Фарадей», разработанных одним из авторов настоящей статьи и изготовленных под его руководством (<https://binhi.info>, дата обращения 30.06.2024). С использованием кубической 3-м системы «Фарадей», рис. 2, впервые доказано, что незначительные флуктуации геоМП являются одной из непосредственных причин наблюдаемых корреляций геомагнитной возмущенности и физиологического состояния организма [55]. Показано, что гипоМП вызывает статистически значимые изменения некоторых физиологических характеристик организма человека [56,57].



Рис. 2. Система магнитной экспозиции «Фарадей», предназначенная для мониторинга локального МП, — в частности, для записи и последующего воспроизведения магнитных бурь в лабораторных условиях.

Fig. 2: Magnetic exposure system "Faraday", designed for monitoring local magnetic fields, specifically for recording and reproducing magnetic storms in a laboratory setting.

В то же время в [58] таких изменений не найдено. В данной работе была использована система экспозиции «Арфа», как и в предыдущих работах, в которых эффект наблюдали, однако система была перемещена в другое здание. Заметим, что «Арфа» позволяет компенсировать МП и его флуктуации только по одной оси. По другим осям величина МП минимизируется лишь ориентацией главной оси бокса экспозиции вдоль усредненного вектора геоМП. Флуктуации локального МП по перпендикулярным осям не устраняются. Уровень флуктуаций сильно меняется в зависимости от расположения системы и может достигать в условиях большого города величин порядка микротесла. Непонятно, почему авторы не публикуют этой информации, заявляя в то же время о тысячекратном подавлении геоМП. Наличие остаточных флуктуаций МП означает, что величина создаваемого гипоМП может меняться в десятки раз в зависимости от размещения, что определенно сказывается на воспроизводимости наблюдаемых магнитных явлений.

[59] В [59] обследовали с двойным слепым контролем восемь мужчин, находившихся в «Арфе» в гипоМП около 100 нТл (см. однако вышеприведенное замечание) до 24 ч. Определяли 48 биохимических показателей из образцов венозной крови. Было установлено, что воздействие вызывает физическое утомление без выраженных субъективных ощущений.

Исследовали также сухие пятна крови хроматографически [60]; по этим данным эффект гипоМП либо отсутствовал, либо был недостоверным в силу недостаточной статистики.

В одной из последних публикаций [61] сообщается об экспозиции в системе «Арфа» шести мужчин при снижении геоМП до 1000 раз в течение 32 ч. К сожалению, в статье отсутствуют формулировки статистических гипотез и детали способа обработки данных, что не позволяет сделать надежных выводов. Тем не менее, можно было бы согласиться с заключением авторов о разном влиянии гипоМП на испытуемых в группах с преобладанием симпатических и парасимпатических влияний. Это требует дальнейших исследований при помощи более совершенных адаптивных систем магнитной экспозиции.

С одной стороны, как видно, имеется всего около десяти независимых научных коллективов, изучавших влияние гипоМП на организм человека, и немного большее количество публикаций. Этого не достаточно для каких-либо классификаций полученных данных или для надежных обобщений, тем более, что нет пока результатов, воспроизведенных разными лабораториями. С другой стороны, есть уже много данных о действии гипоМП на организмы вообще. Эти данные допускают классификации по физическим [17] и по биологическим [18,20] параметрам. Они ясно показывают, что эффекты гипоМП представлены практически во всех организмах и на всех уровнях организации. Другими словами, это фундаментальное явление, требующее глубокого изучения, в особенности в отношении организма человека.

Таким образом, доступные данные о влиянии гипоМП на организм человека противоречивы и пока не обладают должной согласованностью. Можно заключить лишь, что в ответ на экспозицию в гипоМП имеется тенденция к неблагоприятным следствиям, выражаящимся в снижении совершенства когнитивных функций в среднем. В то же

время испытатели показывают разнонаправленные индивидуальные эффекты величиной до 10% в тестах на чувствительность зрительного анализатора, на число ошибок и время выполнения заданий^[14,62]. Это имеет прямое отношение к длительному пребыванию космонавтов на базовых станциях в ходе будущих дальних космических миссий, — МП в них будет в 100 и более раз меньше, чем на Земле. ГипоМП, наряду с гипогравитацией и радиацией, может быть фактором риска для космонавтов и их деятельности.

Молекулярные механизмы действия гипоМП

Подробное обсуждение возможных молекулярных механизмов действия гипоМП имеется в^[17]. Действие МП на организмы вообще подразумевает действие на магнитные моменты атомов и молекул с необходимостью. Это требование выделяет правдоподобные механизмы из большого числа предложенных. Наиболее обсуждаемым к настоящему времени является спин-химический механизм радикальных пар, в котором МП действует на спиновые магнитные моменты электронов радикальных пар^[63–65]. Проблема состоит в том, что чувствительность этого механизма к МП низка и пока не соответствует величине наблюдаемых явлений. Поэтому разрабатывались и альтернативные механизмы влияния МП на абстрактные одиночные магнитные моменты^[66], на магнитные моменты ядер^[67,68] и орбитального движения молекулярных групп внутри белков и в других биофизических структурах^[17,69]. Иная возможность состоит в действии МП на макроскопические магнитные моменты магнитных наночастиц, см. напр.^[70,71], присутствующих во многих организмах. Однако данный механизм неправдоподобен в организмах типа растений и разных бактерий, где магнитных наночастиц заведомо нет, но отклик на изменение МП имеется. Заметим, что много предложенных механизмов, основанных на силе Лоренца, на циклотронном и параметрическом резонансе и др. представляют на сегодня лишь исторический интерес^[11].

Недавно предложен сценарий усиления малых первичных химических сигналов в ответ на изменение внешнего МП^[40], способный снять недостаток чувствительности спин-химического механизма. Чувствительность может быть усиlena на два-три порядка включением спин-коррелированных радикальных пар в работу биополимерных ферментов, в частности, рибосомальных. При этом первичный сигнал МП преобразуется в рост количества неправильно свернутых нефункциональных и часто токсичных белковых глобул. Это создает дополнительную нагрузку на защитные функции организма и сказывается на скорости и безошибочности когнитивных процессов.

Обсуждение

В РФ существуют санитарные нормы СанПиН 2.1.8/2.2.4.2489-09, согласно которым пребывание в МП, ослабленном в 4 раза, должно быть не более двух часов в день. Это ограничивает неблагоприятное воздействие гипоМП на человека в производственных, жилых и общественных зданиях и сооружениях. Подобное ограничение, — самим фактом своего существования, — свидетельствует о признании неблагоприятного влияния гипоМП на здоровье человека.

В условиях дальнего космического полета и планируемых миссий с продолжительным пребыванием человека на Луне и Марсе воздействие гипоМП будет хроническим. Возможные последствия столь длительной экспозиции организма человека в гипоМП пока неясны. Можно однако утверждать, что гипоМП, наряду с гипогравитацией и радиацией, является фактором риска для здоровья и деятельности космонавтов.

Имеется информация о том, что действие МП на клетки заметно меняет величину эффектов ионизирующей радиации в них^[38]. Иными словами, радиация и МП обладают синергическим действием. Не исключено, что гипоМП усиливает негативное влияние ионизирующего излучения и микро- и гипогравитации. К настоящему времени эффекты попарного комбинированного воздействия данных трех факторов на организм человека не изучены. Таким образом, разработка экспериментальной модели комбинированного воздействия гипомагнитной среды, гипогравитации и ионизирующего излучения является актуальной научной задачей.

Известно, что влияние МП на организм человека имеет индивидуальный характер^[46,47,62]. Массивы значений измеряемых в опыте характеристик организма по этой причине являются гетерогенными, — т.е. не относятся к единой статистической популяции. Поэтому для обработки гетерогенных результатов экспериментов в области магнитобиологии стандартных статистических методов недостаточно, поскольку простое осреднение наблюдаемых отклонений по статистической выборке испытателей дает близкий к нулевому эффект. Для получения надежных выводов требуются специальные статистические методы^[14].

Обосновать природу эффектов гипоМП и оценить величину риска непросто, поскольку необходимо создать гипоМП в лабораторных условиях на Земле и протестировать немалое количество животных и испытателей. Производителей систем гипомагнитной экспозиции нет. Каждое устройство является уникальным, дорогим и высокотехнологичным. В настоящее время в Федеральном научно-клиническом центре Космической медицины ФМБА разрабатывается специальный проект, результатом которого будут научные оценки рисков хронического пребывания в гипоМП и средств соответствующей защиты. Будут разработаны методики тестирования космонавтов-кандидатов на индивидуальную чувствительность к ослаблению МП. Возрастет понимание природы повсеместного фундаментального явления действия МП на организмы.

К числу первоочередных в данном направлении можно было бы отнести следующие задачи. 1) Анализ существующих средств и методов создания гипоМП, сходных с ожидаемыми в пилотируемых межпланетных миссиях. 2) Разработка и создание экспериментальных устройств для экспозиции человека и малых лабораторных животных в гипоМП. 3) Проведение экспериментальных исследований для уточнения механизмов влияния гипоМП на живые организмы. 4) Проведение экспериментальных исследований по оценке когнитивных функций и физиологических сдвигов в организме человека в условиях комбинированного действия гипоМП и гипогравитации, — в условиях, характерных для пилотируемого полета на Луну. 5) Теоретическое изучение механизмов комбинированного действия на организм комплекса факторов, присущих межпланетной пилотируемой экспедиции.

Заключение

На сегодня надежно установлено, что гипоМП меняет функционирование организмов от бактерий и грибов до млекопитающих и человека. Эти эффекты имеют выраженный случайный и индивидуальный характер, что требует специальных статистических методов обработки результатов. Влияние гипоМП на организм человека не изучено в мере, достаточной для выводов о влиянии его на здоровье и показатели когнитивной деятельности. Длительное нахождение человека в гипоМП является, наряду с гипогравитацией и ионизирующей радиацией, одним из неблагоприятных факторов внешней среды. Из-за отсутствия достаточного количества экспериментальных,

наблюдательных и теоретических исследований однозначно ответить на вопрос, вынесенный в название статьи, пока невозможно. В этой ситуации принцип предосторожности как разумная стратегия управления рисками предусматривает продолжение исследований.

В связи с этим исследования влияния хронического гипоМП на здоровье человека и разработка средств и способов защиты являются актуальными и необходимыми мерами по медицинскому обеспечению безопасности человека, — сохранению его здоровья и работоспособности в межпланетных космических полетах.

Библиография

1. Barnothy M.F. Biological Effects of Magnetic Fields. New York: Plenum, 1964.
2. Grissom C.B. Magnetic field effects in biology: A survey of possible mechanisms with emphasis on radical-pair recombination // Chemical Reviews. 1995. Vol. 95, № 1. P. 3–24.
3. Бинги В.Н. Принципы электромагнитной биофизики. М.: Физматлит, 2011.
4. Бучаченко А.Л. Магнито-зависимые молекулярные и химические процессы в биохимии, генетике и медицине // Успехи химии. 2014. № 1. С. 1–12.
5. Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields. 4th ed. / ed. Greenebaum B., Barnes F. Boca Raton: CRC Press, 2019. Vol. 1, 2.
6. Ghodbane S. et al. Bioeffects of static magnetic fields: Oxidative stress, genotoxic effects, and cancer studies // BioMed Research International. 2013. Vol. 2013. P. 602987.
7. Яновский Б.М. Земной магнетизм. Ленинград: Изд. ЛГУ, 1978.
8. Sarimov R.M., Binhi V.N. Low-frequency magnetic fields in cars and office premises and the geomagnetic field variations // Bioelectromagnetics. 2020. Vol. 41, № 5. P. 360–368.
9. Павлович С.А. Магнитная восприимчивость организмов. Минск: Наука и техника, 1985.
10. Холодов Ю.А. Магнетизм в биологии. М.: Наука, 1970.
11. Бинги В.Н., Рубин А.Б. О квантовой природе магнитных явлений в биологии // Физика биологии и медицины. 2023. № 1. С. 44–73.
12. Wiltschko R., Wiltschko W. Magnetic Orientation in Animals. Berlin: Springer, 1995.
13. Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрович А.А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: Физические проблемы и перспективы // Успехи физических наук. 2016. № 5. С. 568–576.
14. Binhi V.N. Random effects in magnetobiology and a way to summarize them // Bioelectromagnetics. 2021. Vol. 42, № 6. P. 501–515.
15. Huss A., Peters S., Vermeulen R. Occupational exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of ALS: A systematic review and meta-analysis // Bioelectromagnetics. 2018. Vol. 39, № 2. P. 156–163.
16. IARC. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Vol. 80. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. Lyon: IARC Press, 2002.
17. Binhi V.N., Prato F.S. Biological effects of the hypomagnetic field: An analytical review of experiments and theories // PLoS ONE. 2017. Vol. 12, № 6. P. e0179340.
18. Sarimov R.M., Serov D.A., Gudkov S.V. Hypomagnetic conditions and their biological action (review) // Biology. 2023. Vol. 12, № 1513.
19. Никитина Е.А. et al. Слабое статическое магнитное поле: Воздействие на нервную систему // Журнал высшей нервной деятельности. 2022. № 6. P. 783–799.
20. Sinčák M., Sedlakova-Kadukova J. Hypomagnetic fields and their multilevel effects on living organisms // Processes. 2023. Vol. 11, № 282.
21. Тараков Л.В. Земной магнетизм. Долгопрудный: Издательский Дом Интеллект, 2012.
22. Физика космоса – Маленькая энциклопедия. 2-е изд. / ред. Сюняев Р.А. М.: Советская энциклопедия, 1986.

23. Kokhan V.S. et al. Risk of defeats in the central nervous system during deep space missions // *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*. Elsevier Science, 2016. P. S0149763416302974.
24. Oliveira J.S., Wieczorek M.A. Testing the axial dipole hypothesis for the moon by modeling the direction of crustal magnetization // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2017. Vol. 122, № 2. P. 383–399.
25. Klokočník J. et al. *Atlas of the Gravity and Magnetic Fields of the Moon*. Switzerland AG: Springer Geophysics, 2022.
26. Бреус Т.К. et al. Особенности магнитосферы Марса по данным спутников *Марс-3* и *Фобос-2*: сопоставление с результатами *MGS* и *MAVEN* // Космические исследования. 2021. № 6. С. 504–518.
27. Binhi V.N., Rubin A.B. Theoretical concepts in magnetobiology after 40 years of research // *Cells*. 2022. Vol. 11, № 2. P. 274.
28. Dhiman S.K., Galland P. Effects of weak static magnetic fields on the gene expression of seedlings of *Arabidopsis thaliana* // *Journal of Plant Physiology*. 2018. Vol. 231. P. 9–18.
29. Volpe P., Eremenko T. Gene expression in a space-simulating magnetically shielded environment // *The Environmentalist*. 2005. Vol. 25, № 2. P. 83–92.
30. Wang X.K. et al. Effects of hypomagnetic field on magnetosome formation of *Magnetospirillum magneticum* AMB-1 // *Geomicrobiology Journal*. 2008. Vol. 25, № 6. P. 296–303.
31. Martino C.F. et al. Effects of weak static magnetic fields on endothelial cells // *Bioelectromagnetics*. 2010. Vol. 31, № 4. P. 296–301.
32. Xu C. et al. A near-null magnetic field affects cryptochrome-related hypocotyl growth and flowering in *Arabidopsis* // *Advances in Space Research*. 2012. Vol. 49, № 5. P. 834–840.
33. Khodanovich M.Yu. et al. Effect of long-term geomagnetic field weakening on aggressiveness of rats and opioidergic neurons activation // *Tomsk State University Journal of Biology*. 2013. № 1(21). P. 146–160.
34. Mo W.-C. et al. Transcriptome profile of human neuroblastoma cells in the hypomagnetic field // *Science China – Life Sciences*. 2014. Vol. 57, № 4. P. 448–461.
35. Wan G.-J. et al. Cryptochromes and hormone signal transduction under near-zero magnetic fields: New clues to magnetic field effects in a rice planthopper // *PLoS One*. 2015. Vol. 10, № 7. P. e0132966.
36. Xu C. et al. Gibberellins are involved in effect of near-null magnetic field on *arabidopsis* flowering // *Bioelectromagnetics*. 2017. Vol. 38, № 1. P. 1–10.
37. Thun-Battersby S., Mevissen M., Loscher W. Exposure of Sprague-Dawley rats to a 50-Hertz, 100-Tesla magnetic field for 27 weeks facilitates mammary tumorigenesis in the 7,12-dimethylbenz[a]-anthracene model of breast cancer // *Cancer Research*. 1999. Vol. 59, № 15. P. 3627–3633.
38. Politanski P. et al. Combined effect of X-ray radiation and static magnetic fields on reactive oxygen species in rat lymphocytes in vitro // *Bioelectromagnetics*. John Wiley; Sons, 2013. Vol. 34, № 4. P. 333–336.
39. Buchachenko A.L., Kuznetsov D.A. Genes and cancer under magnetic control // *Russian Journal of Physical Chemistry B*. 2021. Vol. 15, № 1. P. 1–11.
40. Binhi V.N. Statistical amplification of the effects of weak magnetic fields in cellular translation // *Cells*. 2023. Vol. 12. P. 724.
41. Зельдович Я.Б., Бучаченко А.Л., Франкевич Е.Л. Магнитно-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // УФН. 1988. № 1. С. 3–45.
42. Miller A.B. et al. Cancer epidemiology update, following the 2011 IARC evaluation of radiofrequency electromagnetic fields (Monograph 102) // *Environmental Research*. 2018.

- Vol. 167. P. 673–683.
43. Makinistian L., Vives L. Devices, facilities, and shielding for biological experiments with static and extremely low frequency magnetic fields // IEEE Journal of Electromagnetics, RF, and Microwaves in Medicine and Biology. 2024. Vol. 8. P. 1–16.
44. Di Lazzaro V. et al. A consensus panel review of central nervous system effects of the exposure to low-intensity extremely low-frequency magnetic fields // Brain Stimulation. 2013. Vol. 6, № 4. P. 469–476.
45. Cremer-Bartels G., Krause K., Küchle H.J. Influence of low magnetic-field-strength variations on the retina and pineal gland of quail and humans // Albrecht von Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. 1983. Vol. 220, № 5. P. 248–252.
46. Legros F., Beuter A. Individual subject sensitivity to extremely low frequency magnetic field // NeuroToxicology. 2006. Vol. 27, № 4. P. 534–546.
47. Carrubba S. et al. Evidence of a nonlinear human magnetic sense // Neuroscience. 2007. Vol. 144, № 1. P. 356–367.
48. Beischer D.E., Miller E.F. II, Knepton J.C. Jr. Exposure of man to low intensity magnetic fields in a coil system. Pensacola, Florida: Naval Aerospace Medical Institute, NAMI-1018, 1967.
49. Thoss F., Bartsch B. The geomagnetic field influences the sensitivity of our eyes // Vision Research. 2007. Vol. 47, № 8. P. 1036–1041.
50. Саримов Р.М., Бинги В.Н., Миляев В.А. Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека // Биофизика. 2008. № 5. С. 856–866.
51. Саримов Р.М. Влияние гипомагнитных условий на размер зрачка человека // Физика биологии и медицины. 2024. (В этом выпуске)
52. Wang C.X. et al. Transduction of the geomagnetic field as evidenced from alpha-band activity in the human brain // eNeuro. 2019. Vol. 6, № 2. P. e0483.
53. Chae K.-S. et al. Human magnetic sense is mediated by a light and magnetic field resonance-dependent mechanism // Scientific Reports. 2022. Vol. 12, № 1. P. 8997.
54. Pishchalnikov R.Y. et al. Cardiovascular response as a marker of environmental stress caused by variations in geomagnetic field and local weather // Biomedical Signal Processing and Control. 2019. Vol. 51. P. 401–410.
55. Gurfinkel Yu.I. et al. Geomagnetic storm under laboratory conditions: Randomized experiment // International Journal of Biometeorology. 2017. Vol. 62, № 4. P. 501–512.
56. Gurfinkel Yu.I. et al. Effect of zero magnetic field on cardiovascular system and microcirculation // Life Sciences in Space Research. 2016. Vol. 8. P. 1–7.
57. Демин А.В., Суворов А.В., Орлов О.И. Особенности гемодинамики у здоровых мужчин в гипомагнитных условиях // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2021. № 2. С. 63–68.
58. Kukanov V.Y. et al. Effect of simulated hypomagnetic conditions on some physiological parameters under 8-hour exposure. Experiment Arfa-19. // Human Physiology. 2023. Vol. 49, № 2. P. 138–146.
59. Маркин А.А. et al. Влияние гипомагнитной среды на метаболизм и психофизиологические реакции здорового человека // Физиология человека. 2023. № 6. С. 84–91.
60. Каширина Д.Н. et al. Исследование белкового состава сухих пятен крови здоровых добровольцев в эксперименте с гипомагнитными условиями // Физиология человека. 2023. № 1. С. 104–115.
61. Попова О.В., Русанов В.Б., Орлов О.И. Вегетативная регуляция кровообращения и биоэлектрические процессы в миокарде человека в моделируемых гипомагнитных условиях // Медицина экстремальных ситуаций. 2024. № 2. С. 1–9.
62. Бинги В.Н. Два типа магнитных биологических эффектов: Индивидуальный и

- групповой // Биофизика. 2012. № 2. С. 338–345.
63. Buchachenko A. Magneto-Biology and Medicine. New York: Nova Science, 2014.
 64. Hore P.J., Mouritsen H. The radical-pair mechanism of magnetoreception // Annual Review of Biophysics. 2016. Vol. 45, № 1. P. 299–344.
 65. Binhi V.N. Nonspecific magnetic biological effects: A model assuming the spin-orbit coupling // The Journal of Chemical Physics. 2019. Vol. 151, № 20. P. 204101.
 66. Binhi V.N., Prato F.S. A physical mechanism of magnetoreception: Extension and analysis // Bioelectromagnetics. 2017. Vol. 38, № 1. P. 41–52.
 67. Бинги В.Н. Ядерные спины в первичных механизмах биологического действия магнитных полей // Биофизика. 1995. № 3. С. 677–691.
 68. Бинги В.Н. Дефекты структуры жидкой воды в магнитном и электрическом полях // Биомедицинская радиоэлектроника. 1998. № 2. С. 7–16.
 69. Binhi V.N., Savin A.V. Molecular gyroscopes and biological effects of weak extremely low-frequency magnetic fields // Physical Review E. 2002. Vol. 65, № 5. P. 051912.
 70. Binhi V.N., Chernavsky D.S. Stochastic resonance of magnetosomes fixed in the cytoskeleton // Biophysics. 2005. Vol. 50, № 4. P. 599–603.
 71. Winklhofer M., Kirschvink J.L. A quantitative assessment of torque-transducer models for magnetoreception // J. R. Soc. Interface. 2010. Vol. 7, № Suppl. 2. P. S273–S289.

Результаты процедуры рецензирования статьи

В связи с политикой двойного слепого рецензирования личность рецензента не раскрывается.

Со списком рецензентов издательства можно ознакомиться [здесь](#).

Статья «Связано ли ослабление магнитного поля в космосе с риском ошибок в деятельности космонавтов?», поданная в журнал «Физика биологии и медицины», является теоретическим исследованием литературных источников без представления собственных экспериментальных исследований авторов, проведённых непосредственно в рамках обсуждаемой работы. То есть данную работу следует считать скорее обзором.

В работе проанализированы 62 литературных источника, авторы обсуждаемой статьи приводили информацию касательно влияния гипомагнитной среды на биологические объекты. Данная тематика является весьма актуальной, так как без понимания изменений в организме, имеющих место при существенном ослаблении влияющего на него магнитного поля, с чем обязательно будут сталкиваться космонавты при межпланетных перелётах, не может идти и речи о планировании пилотируемых межпланетных миссий.

В некоторых местах обсуждаемой статьи информация подаётся не совсем корректно. Так, авторы приводят точное значение величины магнитного поля Земли, не приводя ссылок на литературу. По тексту работу можно найти несколько подобных фраз, где на приведённую информацию нет ссылки. При описании подобных фактов необходимо всегда давать ссылки на источники. Это не только даёт читателю представление о достоверности информации, но также показывает, на сколько научное сообщество вовлечено в данную проблему. Это можно понять по количеству ссылок.

На мой взгляд название статьи выбрано авторами неудачно. Судя по названию, статья должна быть посвящена медицинским аспектам влияния гипомагнитной среды на организм человека с упором на описание её влияния на деятельность нервной системы, анализаторов и моторную деятельность. Однако в данной связи авторами представлена довольно обрывочная несистематизированная информация. Для адекватного понимания читателями вопроса, указанного в названии статьи, авторам следовало бы представить информацию о влиянии гипомагнитной среды на различные системы органов и органные

комплексы, описать физиологические и, возможно, при наличии таковой информации, морфологические изменения. Далее следовало бы привести примеры психофизиологических и профпатологических исследований космонавтов после длительного пребывания на орбите. Проанализировав эти данные в статье, можно было бы хотя бы в первом приближении ответить на вопрос «Связано ли ослабление магнитного поля в космосе с риском ошибок в деятельности космонавтов?»

Это первый вариант доработки статьи.

Второй вариант её доработки предполагает описание влияния гипомагнитной среды на биологические объекты, в целом. В данном случае необходимо изменить название статьи, чтобы оно чётче соответствовало данной тематике. Сам же анализ научных исследований в данном случае целесообразно было бы проводить, разбив исследуемые работы на категории: 1) эксперименты на молекулярных моделях, 2) на органеллах, 3) на клеточных культурах одноклеточных и многоклеточных организмах, 4) на беспозвоночных, 5) на холоднокровных позвоночных, 6) на птицах, 7) на млекопитающих, 8) данные о психофизиологических исследованиях космонавтов после длительного пребывания в гипомагнитной среде.

Обзорная статья, написанная на должном уровне по указанному плану будет представлять реальный интерес и будет обладать очень высокой научной значимостью. Таким образом, статья «Связано ли ослабление магнитного поля в космосе с риском ошибок в деятельности космонавтов?» нуждается в небольшой доработке и может быть принята в печать только после внесения изменений, описанных выше. При выборе того, каким образом проводить доработку статьи, я бы выбрал второй вариант. Однако авторы вольны работать со своей рукописью по своему усмотрению.