

УДК 523.62-337/612.897/612.819.911

## ГИПОМАГНИТНЫЕ УСЛОВИЯ: РИСКИ НАРУШЕНИЙ РЕГУЛЯЦИИ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

Е.Ю. Берсенев, В.Н. Бинги, А.Л. Васин

Канд. биол. наук Е.Ю. Берсенев (ФГБУ «ФНКЦ КМ» ФМБА России, ФИЦ ИУ РАН)

Докт. физ.-мат. наук В.Н. Бинги (ФГБУ «ФНКЦ КМ» ФМБА России, ИОФ РАН)

Канд. биол. наук А.Л. Васин (ГНЦ РФ – ИМБП РАН)

В обзоре представлены краткие данные о магнитном поле Земли, Луны и Марса. Проекты освоения планет заставляют оценивать риски с ними связанные, в том числе риски из-за отсутствия геомагнитного поля – длительного пребывания в условиях ослабленного (гипомагнитного) поля при осуществлении космических полетов и разворачивании напланетных баз. Гипомагнитные поля оказывают преимущественно негативное влияние на основные механизмы регуляции сердечно-сосудистой и когнитивной системы.

**Ключевые слова:** геомагнитное поле, магнитосфера, гипомагнитное поле, сердечно-сосудистая система

### **Hypomagnetic Conditions: Risks of Cardiovascular System Dysregulations (Brief Review). E.Yu. Bersenev, V.N. Binhi, A.L. Vasin**

The review offers concise information about the magnetic fields of the Earth, Moon, and Mars. As we delve into planetary exploration projects, it is crucial to assess the associated risks, encompassing the effects of the absence of a geomagnetic field. This includes prolonged exposure to weakened (hypomagnetic) field during spaceflights and the establishment of planetary bases. Hypomagnetic fields are predominantly detrimental to the fundamental mechanisms of cardiovascular and cognitive regulatory systems.

**Keywords:** geomagnetic field, magnetosphere, hypomagnetic field, cardiovascular system

Считается, что магнитное поле Земли возникает вследствие постоянного движения жидкого металла в ядре планеты, когда в результате динамопроцесса генерируются электрические токи. Эти электрические токи образуют магнитное поле (МП), охватывающее планету и распространяющееся в ближнюю космическую среду. Исследования космического пространства в середине прошлого века открыли магнитосферу Земли – магнитную оболочку нашей планеты, которая экранирует Землю от космической радиации, создающей серьезную опасность для жизни [1–3]. МП сохраняет и удерживает структуру атмосферы, являющейся естественной защитой Земли во время сильных солнечных бурь.

Все живые системы Земли подвергаются воздействию геомагнитного поля (ГМП), меняющегося от около 40 микротесла (мкТл) на экваторе до 60 мкТл – на полюсах. Подавление ГМП в лабораторных условиях сопровождается изменениями поведения и биохимических показателей самых разных организмов: от бактерий и грибов до млекопитающих и человека [4]. ГМП быстро снижается по мере удаления от Земли. Величина МП на Международной космической станции (МКС) на околоземной орбите составляет около 80 % ГМП, а его направление меняется до противоположного на одном витке орбиты.

МП в дальнем космосе намного слабее ГМП. Такие поля называют гипомагнитными (ГипоМП). Сведения о МП Луны были получены в результате анализа образцов лунных пород, полученных в ходе выполнения программы «Аполлон», и из магнитометрических данных программ Lunar Prospector и Kaguya [5–8]. Непосредственные измерения МП в местах пребывания миссий Аполлона не показательны ввиду высокой неоднородности МП Лунной коры, достигающей 1 нанотесла (нТл)/градус [9–10], и магнитных помех вследствие солнечной радиации. На высоте 30 км над лунной поверхностью магнитная индукция очень мала, в основном порядка 1 нТл с россыпью редких аномалий, где МП достигает величин около 10 нТл и более [5]. В различных аномалиях, в которых изменена и гипогравитация, преимущественное направление МП меняется от вертикального до горизонтального [11]. На поверхности Луны, вблизи лунных пород, неоднородных по остаточной намагниченности, МП может достигать локальных значений в несколько сотен нанотесла. Данных о МП планет немного. Например, марсианское МП менее нескольких микротесла, а межпланетное МП составляет всего несколько нанотесла, соответственно МП Марса также является гипомагнитным. Его изучают с 1971 г. по данным феррозондовых измерений с космических аппаратов «Марс», «Фобос», Mars Global Surveyor, MAVEN и др. [12]. Измерения проводились на низких орбитах 100–1000 км над поверхностью планеты. Распределение МП определяется наложением собственного МП Марса в несколько нанотесла, – поля диполя величиной приблизительно на четыре порядка меньше, чем у Земли, – межпланетного МП величиной 3–5 нТл, МП, индуцированного солнечным ветром, и МП магнитных аномалий коры [13]. В результате взаимодействия этих факторов возникает сложная динамическая структура МП, обладающая как мелко-, так и крупномасштабными неоднородностями 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.

Таким образом, помимо микрогравитации (невесомости) и космического излучения, космонавтам и астронавтам приходится подвергаться воздействию ГипоМП и адаптироваться к этим условиям при нахождении

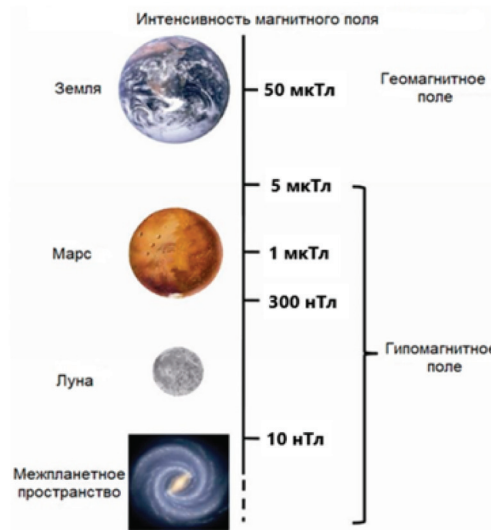


Рис. 1. МП окружающей среды в космическом пространстве и определение ГипоМП

на борту в ходе длительных высокоорбитальных и дальних космических полетов, а в перспективе при перелетах на другие планеты и разворачивании на планетных баз (рис. 1) [14, 15].

### Магнитосфера Луны

В ближайших планах ведущих космических агентств мира, включая Индию и Китай, в качестве основной задачи устанавливается проведение исследований и экспериментов по освоению Луны и переходу от беспилотных автоматических кораблей к пилотируемым миссиям. Исследования лунных пород показывают, что в период около 4,25 и 3,56 миллиардов лет назад лунное ядро «динамо-машины» создавало поверхностное поле интенсивностью от  $\sim 20$  до  $110$  мкТл, что в 2 раза превышает ГМП [16]. Впоследствии напряженность лунного МП снизилась до  $3,2$  А/м ( $\sim 4$  мкТл) около 3,19 миллиардов лет назад, однако осталось невыясненным прекратилась ли к этому времени работа «динамо-машины» или только значительно ослабла. Исследования [17] показывают, что матрица расплавленного стекла, полученного из лунной пыли – реголита, была намагничена в динамическом поле  $\sim 5 \pm 2$  мкТл во временном периоде  $\sim 2,5$ –1 млрд лет назад. По результатам исследований ядро Луны генерировало электрические токи в еще более ранний период, по меньшей мере на 1 миллиард лет раньше расчетных временных промежутков [16].

На пике интенсивности МП ( $\sim 4$  млрд лет назад) Луна была вулканически активна, вероятно, создавая очень разреженную атмосферу, и, как

полагают, находилась на геоцентрическом расстоянии  $\sim 18$  земных радиусов. Солнечные бури со временем разрушают атмосферу планет Солнечной системы, и только сильная магнитосфера может обеспечить максимальную защиту [18]. Источник МП Луны до сих пор неясен. Поле, скорее всего, создавалось самоподдерживающейся «динамо-машиной» в электропроводящем металлическом ядре Луны, но теплового потока через границу ядро – мантия, вероятно, было недостаточно для работы динамо-процесса в известный период времени [5–8, 19–21]. Поскольку сейсмические измерения указывают на существование твердого железного внутреннего сердечника в дополнение ко все еще жидкому внешнему из сплава железа, затвердевание внутреннего ядра и связанная с ним термохимически обусловленная конвекция во внешнем сердечнике могли быть ответственны за продление срока службы «динамо-машины» даже при отсутствии сверхадиабатического (вертикального градиента температуры) теплового потока. Разработанная модель тепловой эволюции мантии и ядра Луны обнаруживает, что затвердевание ядра могло бы объяснить возникновение и отключение лунного динамо-процесса, и в свою очередь снижение интенсивности лунного МП, что и было получено в результате обработки данных палеомагнитных исследований [22, 23].

### **Влияние ГМП и ГипоМП на живые системы и на отдельные функциональные системы организма человека**

Планирование пилотируемых полетов в дальний космос в условиях отсутствия магнитосферы Земли обязывает серьезно отнестись к вопросам экспериментального моделирования ГипоМП, воздействующего на организм человека, и созданию искусственного ГМП для обеспечения безопасности и надежности защиты человека на напланетных базах.

Пионерскими исследованиями о влиянии ГипоМП можно считать исследования доктора Дитриха Е. Байшера. В работе [24] шесть испытуемых в ГипоМП  $\sim 50$  нТл в течении трех недель проходили различные зрительные и психофизиологические тесты. Четверо из шести испытуемых находились в ГипоМП, двое других – в контрольных условиях вне гипомагнитной системы экспозиции. В тесте на измерение частоты слияния световых мельканий у четырех испытуемых было обнаружено статистически значимое уменьшение частоты. Переменные электромагнитные поля также негативно влияют на здоровье человека, что установлено в условиях эпидемиологических [25] и лабораторных исследований [26]. Изучалась чувствительность зрительной системы 55 испытуемых к световому стимулу. В результате нашли, что ГипоМП снижает чувствительность на 6 % [27]. Рядом исследователей изучался вопрос о влиянии на организм МП различной интенсивности и мощности [28–30]. Ранее было показано [4], что существует критическое МП, ниже которого возможны качественные изменения в биологическом

отклике. При этом экспозиция организма человека в сильных МП до 8 Тл, применяемых в медицинских томографах, практически безвредна [31, 32].

Одними из наиболее чувствительных систем организма человека к воздействию ГипоМП являются центральная нервная и сердечно-сосудистая (ССС) системы [33, 34] (рис. 2).

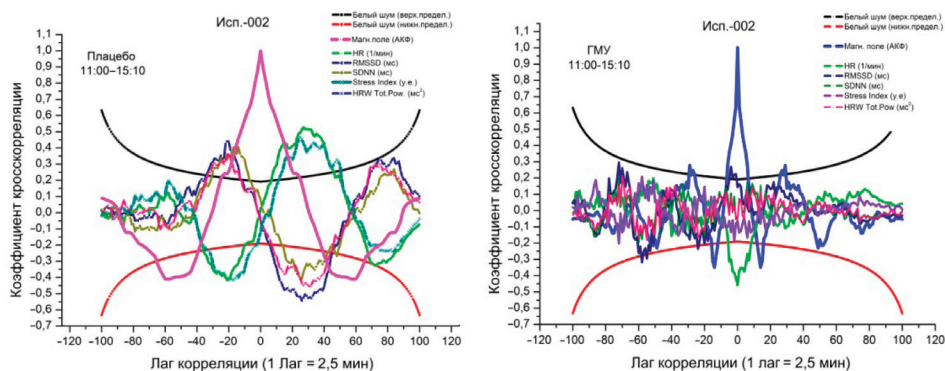


Рис. 2. Пример кросскорреляционного анализа показателей variability сердечного ритма (ВСР) на фоне автокорреляционной функции воздействующего МП при отсутствии или наличии условий компенсации ГМП: *слева* – данные ВСР в условиях нормального ГМП (автокорреляционная функция – жирная розовая линия); *справа* – данные ВСР в условиях компенсированного ГМП (автокорреляционная функция – жирная синяя линия)

В РФ разработаны нормативы, дающие определение экранированным помещениям и объектам, ГипоМП и регламентирующие безопасную длительность работы человека в этих условиях [35]. Результаты исследования когнитивной деятельности человека, проведенного на 40 испытуемых-добровольцах, показывают, что ослабление (компенсация) ГМП в 100 раз в течение более 1 часа угнетает когнитивную деятельность человека, выражающуюся в росте количества ошибок и замедлении времени ответа в тестах [34]. Возникает дисбаланс основных нервных процессов, например, в виде преобладания процессов торможения, удлинения времени реакции на появление объекта в режиме его субъективного восприятия, возрастания амплитуды нормального физиологического тремора. Рядом исследований установлено негативное влияние ослабления и колебаний ГМП на состояние сердечно-сосудистой системы:

- в условиях окислительного стресса ослабленное МП может нарушать функциональное состояние эритроцитов и способствовать гибели клеток [36];
- при воздействии ГипоМП на эмбрионы японских перепелов проявлялись нарушения в развитии сердечно-сосудистой системы, выражающиеся в аномалиях формирования сердца и его сосудов [37];
- воздействие ГипоМП влияет на капиллярный кровоток, артериальное давление и частоту сердечных сокращений [38, 39];

• кратковременная (1 час) экспозиция человека в периодически меняющемся ГипоМП приводило к активации механизмов регуляции сердечного ритма, вплоть до неудовлетворительной адаптации по индивидуальным показателям variability сердечного ритма (VSP) [40, 41].

Собственными исследованиями последних лет подтверждена синхронизация сердечного ритма испытуемых с изменениями фонового МП [33]. Результаты кросскорреляционного анализа отдельных показателей VSP показали, что при обычном фоновом МП синхронизация длительности кардиоинтервалов (ДКИ) достигается во временном интервале 100–150 мин. В случае ГипоМП положительная кросскорреляция с длительностью кардиоинтервалов происходит без задержек. Отмечено, что ДКИ синхронизированы или следуют за локальным ГМП. Очевидно, колебания локального, фонового МП с полупериодом около 2,5 часов вызывают изменения ДКИ с близким полупериодом колебаний, которые отрицательно коррелируют с изменением ГМП (MOS-H – обозначение горизонтальной компоненты ГМП в пределах региона Москвы), данные заимствованы из открытых источников обсерватории Троицка (<https://geodata.izmiran.ru/>) на экспериментальный день записи без компенсации МП (рис. 3).

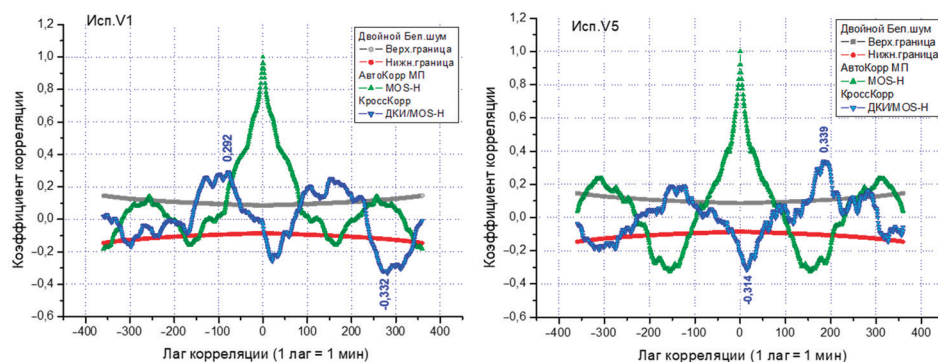


Рис. 3. Кросскорреляция ДКИ двух испытуемых (V1 и V5):

*синяя линия* – пиковые значения коэффициента кросскорреляции указаны цифрами;  
*зеленая линия* – автокорреляция ГМП – MOS-H (данные ИЗМИРАН)

## Выводы

Таким образом, стоит предположить, что нормальные уровни ГМП обеспечивают здоровое функционирование многих физиологических систем организма, а колебания (их периодичность) геомагнитных вариаций способны задавать ритмы функционирования отдельных систем организма человека с их синхронизацией в краткосрочном (циркадном) интервале. Авторы предлагают рассмотреть не весь спектр воздействия ГМП на человека, а исключительно условия контролируемой модели, а также наличия индивидуальной нормы чувствительности к действию ГипоМП у отдельных испытуемых.

В случае удаления от земной орбиты уменьшается влияние на организм вариаций ГМП из-за снижения уровня МП, что увеличивает риск десинхронизации внутренних ритмов функциональных систем организма и в первую очередь ССС.

Анализ влияния ГипоМП на здоровье человека показывает, что в случае осуществления дальних межпланетных полетов, в том числе к Луне и Марсу, необходимо создание в корабле (или напланетной базе) управляемого МП с характеристиками, аналогичными МП на поверхности Земли.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гульельми, А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы / А.В. Гульельми, В.А. Троицкая. – Москва: Наука, 1973. – 208 с.
- [2] Пудовкин, М.И. Возмущения электромагнитного поля Земли / М.И. Пудовкин, О.М. Распопов, Н.Г. Клейменова; Ленингр. гос. ун-т им. А.А. Жданова. – Ленинград: ЛГУ, 1975.  
Ч. 1: Полярные магнитные возмущения. – 1975. – 219 с.  
Ч. 2: Короткопериодические колебания геомагнитного поля. – 1976. – 269 с.
- [3] Яновский, Б.М. Земной магнетизм: Учеб. пособие для физ. спец. вузов. – Ленинград: ЛГУ, 1978. – 591 с.
- [4] Binhi, V.N. Biological Effects of the Hypomagnetic Field: an Analytical Review of Experiments and Theories / V.N. Binhi, F.S. Prato // PLoS ONE. – 2017. – No 12(6). – DOI: 10.1371/journal.pone.0179340
- [5] Oliveira, J.S. Testing the Axial Dipole Hypothesis for the Moon by Modeling the Direction of Crustal Magnetization: Modeling the Lunar Crustal Magnetization / J.S. Oliveira, M.A. Wieczorek // Journal of Geophysical Research Planets. – 2017. – No 122(2). – P. 383–399. – DOI: 10.1002/2016je005199
- [6] Collinson, D.W. Magnetism of the Moon–Lunar Core Dynamo or Impact Magnetization // Surveys in Geophysics. – 1993. – No 14. – P. 89–118. – DOI: 10.1007/bf01044078
- [7] Fuller, M. Lunar Paleomagnetism, Geomagnetism / M. Fuller, S.M. Cisowski. Academic Press, 1987. – P. 307–455.
- [8] Weiss, B.P. The lunar dynamo / B.P. Weiss, S.M. Tikoo // Science. – 2014. – P. 346–1198. – DOI: 10.1126/science.1246753
- [9] Hood, L.L. Contour Maps of Lunar Remanent Magnetic Fields / L.L. Hood, C.T. Russell, P.J. Coleman // Journal of Geophysical Research: William Byrd Press for John Hopkins Press, 1981. – Vol. 86. – P. 1055–1069.
- [10] Atlas of the Gravity and Magnetic Fields of the Moon / J. Klokočník, J. Kostecký, V. Cílek, A. Bezděk [et al.] // Springer Geophysics. – 2022. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-08867-4>.
- [11] Hemingway, D. Magnetic Field Direction and Lunar Swirl Morphology: Insights from Airy and Reiner Gamma / D. Hemingway, I. Garrick-Bethell // Journal of Geophysical Research: Planets. – 2012. – Vol. 117. – 19 p. – DOI: 10.1029/2012je004165
- [12] Бреус, Т.К. Палеомагнитные поля Марса и их взаимодействие с солнечным ветром / Т.К. Бреус, А.М. Крымский // Космические исследования. – 2017. – Т. 55, № 4. – С. 249–262.

- [13] Особенности магнитосферы Марса по данным спутников Марс-3 и Фобос-2: сопоставление с результатами MGS и MAVEN / Т.К. Бреус, М.И. Веригин, Г.А. Котова, Дж.А. Славин // *Космические исследования*. – 2021. – Т. 59, № 6. – С. 504–518.
- [14] Mo, W. Hypomagnetic Field, an Ignorable Environmental Factor in Space? / W. Mo, Y. Liu, R. He // *Science China Life Sciences*. – 2014. – No 57. – P. 726–728. – DOI: 10.1007/s11427-014-4662-x
- [15] Mo, W.C. A Biological Perspective of the Hypomagnetic Field: From Definition Towards Mechanism / W.C. Mo, Y. Liu, R.Q. He // *Prog Biochem Biophys*. – 2012. – No 39. – P. 835–842. – DOI: 10.3724/SP.J.1206.2011.00597
- [16] Arkani-Hamed, J. The History of the Core Dynamos of Mars and the Moon Inferred from Their Crustal Magnetization: a Brief Review // *Canadian Journal of Earth Sciences*. – 2019. – No 56. – P. 917–931. – DOI: 10.1139/cjes-2018-0068
- [17] A Two-Billion-Year History for the Lunar Dynamo / S.M. Tikoo, B.P. Weiss, D.L. Shuster, C. Suavet [et al.] // *Science Advances*. – 2017. – No 3(8). – 9 p. – DOI: 10.1126/sciadv.1700207
- [18] Green, J. When the Moon Had a Magnetosphere / J. Green, D. Draper, S. Boardsen, C. Dong // *Science Advances*. – 2020. – No 6(42). – DOI: 10.1126/sciadv.abc0865
- [19] Cournède, C. Magnetic Study of Large Apollo Samples: Possible Evidence for an Ancient Centered Dipolar Field On the Moon / C. Cournède, J. Gattacceca, P. Rochette // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2012, May. – Vol. 331–332. – P. 31–42. – DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.004
- [20] Evans, A.J. The Case Against an Early Lunar Dynamo Powered by Core Convection / A.J. Evans, S.M. Tikoo, J.C. Andrews-Hanna // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – No 45(1). – P. 98–107. – DOI: 10.1002/2017gl075441
- [21] Early Lunar Magnetism / I. Garrick-Bethell, B.P. Weiss, D.L. Shuster, J. Buz // *Science*. – 2009. – No 323 – P. 356–359. – DOI: 10.1126/science.1166804
- [22] The end of the lunar dynamo / S. Mighani, H. Wang, D.L. Shuster, C.S. Borlina, [et al.] // *Science Advances*. – 2020, Jan 1. – No 6(1). – DOI: 10.1126/sciadv.aax0883
- [23] Scheinberg, A. Magnetic Field Generation in the Lunar Core: The Role of Inner Core Growth / A. Scheinberg, K.M. Soderlund, G. Schubert // *Icarus*. – 2015. – No 254. – P. 62–71.
- [24] Beischer, D.E. Exposure of Man to Low Intensity Magnetic Fields in a Coil System / D.E. Beischer, E.F. Miller, J.C. Knepton // Pensacola, Florida: Naval Aerospace Medical Institute, Naval Aviation Medical Center, 1967. – P. 26.
- [25] Schüz, J. Electromagnetic Fields and Epidemiology: an Overview Inspired by the Fourth Course at the International School of Bioelectromagnetics / J. Schüz, S. Lagorio, F. Bersani // *Bioelectromagnetics*. – 2009. – Vol. 30, No 7. – P. 511–24.
- [26] Exposure to ELF Magnetic and ELF-Modulated Radiofrequency Fields: the Time Course of Physiological and Cognitive Effects Observed in Recent Studies (2001–2005) / C.M. Cook, D.M. Saucier, A.W. Thomas, F.S. Prato // *Bioelectromagnetics*. – 2006. – Vol. 27, No 8. – P. 613–27.
- [27] Thoss, F. The Geomagnetic Field Influences the Sensitivity of Our Eyes / F. Thoss, B. Bartsch // *Vision Res*. – 2007. – Vol. 47, No 8. – P. 1036–41.
- [28] Tenforde, T.S. Interaction of Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields with Humans / T.S. Tenforde, W.T. Kaune // *Health Physics*. – 1988. – No 53(6) – P. 585–606.



- [29] King, R.W. An Examination of Underlying Physical Principles. The Interaction of Power-Line Electromagnetic Fields With the Human Body // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. – 1998, Nov-Dec. – No 17(6). – P. 67–73.
- [30] Karimi, A. Insights in the Biology of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields Exposure on Human Health / A. Karimi, F. Ghadiri Moghaddam, M. Valipour // *Mol Biol Rep*. – 2020. – No 47. – P. 5621–563. – DOI: [org/10.1007/s11033-020-05563](https://doi.org/10.1007/s11033-020-05563)
- [31] Schenck, J.F. “Safety of strong, static magnetic fields” // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. – 2000. – No 12(1). – P. 2–19.
- [32] Kim, S.J. “Safety issues and updates under MR environments” / S.J. Kim, K.A. Kim // *European Journal of Radiology*. – 2017. – No 89. – P. 7–13.
- [33] Changes in the Heart Autonomic Regulation after Many Hours of Compensation of the Earth Magnetic Field / E.Yu. Bersenev, A.L. Vasin, M.R. Onuchina, V.Yu. Kukanov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*, 20 July, 2023. – Vol. 2549(1). – DOI: [10.1063/5.0108368](https://doi.org/10.1063/5.0108368)
- [34] Саримов, Р.М. Влияние компенсации геомагнитного поля на когнитивные процессы человека / Р.М. Саримов, В.Н. Бинги, В.А. Миляев // *Биофизика*. – 2008. – Т. 53, № 5. – С. 856–866.
- [35] ГОСТ 51724-2001 «Экранированные объекты, помещения, технические средства. Поле гипогеомагнитное. Методы измерений и оценки соответствия уровней полей техническим требованиям и гигиеническим нормативам». – Москва: Госстандарт РФ, 2001.
- [36] A Hypomagnetic Field Modulates the Susceptibility of Erythrocytes to tert-Butyl Hydroperoxide in Rats / M.A. Terpilovskii, D.A. Khmelevskoy, B.F. Shchegolev [et al.] // *Biophysics*. – 2019. – No 64. – P. 374–380. – DOI: [10.1134/S0006350919030230](https://doi.org/10.1134/S0006350919030230)
- [37] Исследование влияния пониженного магнитного поля Земли и его сочетания с низкочастотным магнитным полем на эмбриональное развитие японского перепела / Т.С. Гурьева, О.А. Дадашева, М.И. Ездакова, А.В. Спасский [и др.] // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2017. – Т. 51, № 5. – С. 55–62. – DOI: [10.21687/0233-528X-2017-51-5-55-62](https://doi.org/10.21687/0233-528X-2017-51-5-55-62)
- [38] Effect of Zero Magnetic Field on Cardiovascular System and Microcirculation / Y.I. Gurfinkel, O.Y. At'kov, A.L. Vasin [et al.] // *Life Sciences in Space Research*. 2016. – No 8. – P. 1–7.
- [39] Evaluation of Combined Effects of Lunar Gravity Simulation and the Altered Magnetic Field on Cardiovascular System of Healthy Volunteers. *Front. Physiol.* / Y.I. Gurfinkel, M.V. Baranov, A.L. Vasin, R.Y. Pishchalnikov // *Conference Abstract: 39th ISGP Meeting & ESA Life Sciences Meeting*, 2019. – DOI: [10.3389/conf.fphys.2018.26.00026](https://doi.org/10.3389/conf.fphys.2018.26.00026)
- [40] Cardiovascular Response as a Marker of Environmental Stress Caused By Variations in Geomagnetic Field and Local Weather / R.Y. Pishchalnikov, Y.I. Gurfinkel, R.M. Sarimov [et al.] // *Biomed Signal Process Control*. – 2019. – Vol. 51. – P. 401–410. – DOI: [10.1016/j.bspc.2019.03.005](https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.03.005)
- [41] Васин, А.Л. Влияние искусственного периодического геомагнитного поля миллигерцового диапазона на показатели variability сердечного ритма / А.Л. Васин, А.В. Шафиркин, Ю.И. Гурфинкель // *Авиакосмическая и экологическая медицина*. – 2019. – Т. 53, № 6. – С. 62–69. – DOI: [10.21687/0233-528X-2019-53-6-62-69](https://doi.org/10.21687/0233-528X-2019-53-6-62-69)

## REFERENCES

- [1] Guglielmi, A.V. *Geomagnetic Pulsations and Diagnostics of the Magnetosphere* / A.V. Guglielmi, V.A. Troitskaya Moscow: Nauka, 1973.
- [2] Pudovkin, M.I. *Perturbations of the Electromagnetic Field of the Earth* / M.I. Pudovkin, O.M. Raspopov, N.G. Kleimenova; Leningr. State University Named after A.A. Zhdanov. Leningrad: LSU, 1975.  
Part 1: Polar magnetic disturbances. 1975. – 219 p.  
Part 2: Short-Period Fluctuations of the Geomagnetic Field.– 1976. – 269 p.
- [3] Yanovsky, B.M. *Terrestrial Magnetism: a Textbook for Physics. Special Universities.* Leningrad: Publishing House. Leningrad State University, 1978. – 592 p.
- [4] Binhi, V.N. *Biological Effects of the Hypomagnetic Field: an Analytical Review of Experiments and Theories* / V.N. Binhi, F.S. Prato // PLoS ONE. – 2017. – No 12(6). – DOI: 10.1371/journal.pone.0179340
- [5] Oliveira, J.S. *Testing the Axial Dipole Hypothesis for the Moon by Modeling the Direction of Crustal Magnetization: Modeling the Lunar Crustal Magnetization* / J.S. Oliveira, M.A. Wieczorek // Journal of Geophysical Research Planets. – 2017. – No 122(2). – P. 383–399. – DOI: 10.1002/2016je005199
- [6] Collinson, D.W. *Magnetism of the Moon–Lunar Core Dynamo or Impact Magnetization* // Surveys in Geophysics. – 1993. – No 14. – P. 89–118. – DOI: 10.1007/bf01044078
- [7] Fuller, M. *Lunar Paleomagnetism, Geomagnetism* / M. Fuller, S.M. Cisowski. – Academic Press, 1987. – P. 307–455.
- [8] Weiss, B.P. *The Lunar Dynamo* / B.P. Weiss, S.M. Tikoo // Science. – 2014. – P. 346–1198. – DOI: 10.1126/science.1246753
- [9] Hood, L.L. *Contour Maps of Lunar Remanent Magnetic Fields* / L.L. Hood, C.T. Russell, P.J. Coleman // Journal of Geophysical Research: William Byrd Press for John Hopkins Press, 1981. – Vol. 86. – P. 1055–1069.
- [10] *Atlas of the Gravity and Magnetic Fields of the Moon* / J. Klokočník, J. Kostelecký, V. Čílek, A. Bezděk [et al.] // Springer Geophysics. – 2022. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-08867-4>.
- [11] Hemingway, D. *Magnetic Field Direction and Lunar Swirl Morphology: Insights from Airy and Reiner Gamma* / D. Hemingway, I. Garrick-Bethell // Journal of Geophysical Research: Planets. – 2012. – Vol. 117. – 19 p. – DOI: 10.1029/2012je004165
- [12] Breus, T.K. *Paleomagnetic Fields of Mars and Their Interaction with the Solar Wind* / T.K. Breus, A.M. Krymsky // Space Research. – 2017. – Vol. 55. – No 4. – P. 249–262
- [13] *Features of the Martian Magnetosphere According to Data From the Mars-3 and Phobos-2 Satellites: Comparison With the Results of MGS and MAVEN* / T.K. Breus, M.I. Verigin, G.A. Kotova, J.A. Slavin // Space Research. – 2021. – Vol. 59. – No 6. – P. 504–518.
- [14] Mo, W. *Hypomagnetic Field, an Ignorable Environmental Factor in Space?* / W. Mo, Y. Liu, R. He // Science China Life Sciences. – 2014. – No 57(7). – P. 726–728. – DOI: 10.1007/s11427-014-4662-x
- [15] Mo, W.C. *A Biological Perspective of the Hypomagnetic Field: From Definition Towards Mechanism* / W.C. Mo, Y. Liu, R.Q. He // Prog Biochem Biophys. – 2012. – No 39. – P. 835–842. – DOI: 10.3724/SP.J.1206.2011.00597
- [16] Arkani-Hamed, J. *The History of the Core Dynamos of Mars and the Moon Inferred from Their Crustal Magnetization: a Brief Review* // Canadian Journal of Earth Sciences. – 2019. – No 56. – P. 917–931. – DOI: 10.1139/cjes-2018-0068

- [17] A Two-Billion-Year History for the Lunar Dynamo / S.M. Tikoo, B.P. Weiss, D.L. Shuster, C. Suavet [et al.] // *Science Advances*. – 2017. – No 3(8). – 9 p. – DOI: 10.1126/sciadv.1700207
- [18] Green, J. When the Moon Had a Magnetosphere / J. Green, D. Draper, S. Boardsen, C. Dong // *Science Advances*. – 2020. – No 6(42). – DOI: 10.1126/sciadv.abc0865
- [19] Cournède, C. Magnetic Study of Large Apollo Samples: Possible Evidence for an Ancient Centered Dipolar Field on the Moon / C. Cournède, J. Gattacceca, P. Rochette // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2012, May. – Vol. 331–332. – P. 31–42. – DOI: 10.1016/j.epsl.2012.03.004
- [20] Evans, A.J. The Case Against an Early Lunar Dynamo Powered by Core Convection / A.J. Evans, S.M. Tikoo, J.C. Andrews-Hanna // *Geophysical Research Letters*. – 2018. – No 45(1). – P. 98–107. – DOI: 10.1002/2017gl075441
- [21] Early Lunar Magnetism / I. Garrick-Bethell, B.P. Weiss, D.L. Shuster, J. Buz // *Science*. – 2009. – No 323 – P. 356–359. – DOI: 10.1126/science.1166804
- [22] The End of the Lunar Dynamo / S. Mighani, H. Wang, D.L. Shuster, C.S. Borlina, [et al.] // *Science Advances*. – 2020, Jan 1. – No 6(1). – DOI: 10.1126/sciadv.aax0883
- [23] Scheinberg, A. Magnetic Field Generation in the Lunar Core: The Role of Inner Core Growth / A. Scheinberg, K.M. Soderlund, G. Schubert // *Icarus*. – 2015. – No 254. – P. 62–71.
- [24] Beischer, D.E. Exposure of Man to Low Intensity Magnetic Fields in a Coil System / D.E. Beischer, E.F. Miller, J.C. Knepton // Pensacola, Florida: Naval Aerospace Medical Institute, Naval Aviation Medical Center, 1967. – P. 26.
- [25] Schüz, J. Electromagnetic Fields and Epidemiology: an Overview Inspired by the Fourth Course at the International School of Bioelectromagnetics / J. Schüz, S. Lagorio, F. Bersani // *Bioelectromagnetics*. – 2009. – Vol. 30, No 7. – P. 511–24.
- [26] Exposure to ELF Magnetic and ELF-Modulated Radiofrequency Fields: the Time Course of Physiological and Cognitive Effects Observed in Recent Studies (2001–2005) / C.M. Cook, D.M. Saucier, A.W. Thomas, F.S. Prato // *Bioelectromagnetics*. – 2006. – Vol. 27, No 8. – P. 613–27.
- [27] Thoss, F. The Geomagnetic Field Influences the Sensitivity of Our Eyes / F. Thoss, B. Bartsch // *Vision Res*. – 2007. – Vol. 47, No 8. – P. 1036–41.
- [28] Tenforde, T.S. Interaction of Extremely Low Frequency Electric and Magnetic Fields With Humans / T.S. Tenforde, W.T. Kaune // *Health physics*. – 1988. – No 53(6) – P. 585–606.
- [29] King, R.W. An Examination of Underlying Physical Principles. The Interaction of Power-Line Electromagnetic Fields with the Human Body // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. – 1998, Nov-Dec. – No 17(6). – P. 67–73.
- [30] Karimi, A. Insights in the Biology of Extremely Low-Frequency Magnetic Fields Exposure on Human Health / A. Karimi, F. Ghadiri Moghaddam, M. Valipour // *Mol Biol Rep*. – 2020. – No 47. – P. 5621–563. – DOI: org/10.1007/s11033-020-05563
- [31] Schenck, J.F. “Safety of Strong, Static Magnetic Fields” // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. – 2000. – No 12(1). – P. 2–19.
- [32] Kim, S.J. “Safety Issues and Updates Under MR Environments” / S.J. Kim, K.A. Kim // *European Journal of Radiology*. – 2017. – No 89. – P. 7–13.
- [33] Changes in the Heart Autonomic Regulation after Many Hours of Compensation of the Earth Magnetic Field / E.Yu. Bersenev, A.L. Vasin, M.R. Onuchina, V.Yu. Kukanov [et al.] // *AIP Conference Proceedings*, 20 July, 2023. – Vol. 2549(1). – DOI: 10.1063/5.0108368

- [34] Sarimov, R.M. The Influence of Geomagnetic Field Compensation on Human Cognitive Processes / R.M. Sarimov, V.N. Binhi, V.A. Milyaev // *Biophysics*. 2008. – Vol. 53, No 5. – P. 856–866.
- [35] GOST 51724-2001 “Shielded Objects, Premises, Technical Means. The Field is Hypogeomagnetic. Methods for Measuring and Assessing the Compliance of Field Levels With Technical Requirements and Hygienic Standards.” – Moscow: Gosstandart of the Russian Federation, 2001.
- [36] A Hypomagnetic Field Modulates the Susceptibility of Erythrocytes to tert-Butyl Hydroperoxide in Rats / M.A. Terpilovskii, D.A. Khmelevskoy, B.F. Shchegolev [et al.] // *Biophysics*. – 2019. – No 64. – P. 374–380. – DOI: 10.1134/S0006350919030230
- [37] Study of the Influence of the Reduced Earth’s Magnetic Field and its Combination With a Low-Frequency Magnetic Field on the Embryonic Development of a Japanese Quail / T.S. Gurieva, O.A. Dadasheva, M.I. Ezdakova, A.V. Spassky [et al.] // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2017. – Vol. 51, No 5. – P. 55–62. – DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-5-55-62
- [38] Effect of Zero Magnetic Field on Cardiovascular System and Microcirculation / Y.I. Gurfinkel, O.Y. At’kov, A.L. Vasin [et al.] // *Life Sciences in Space Research*. 2016. – No 8. – P. 1–7.
- [39] Evaluation of Combined Effects of Lunar Gravity Simulation and the Altered Magnetic Field on Cardiovascular System of Healthy Volunteers. *Front. Physiol* / Y.I. Gurfinkel, M.V. Baranov, A.L. Vasin, R.Y. Pishchalnikov // *Conference Abstract: 39th ISGP Meeting & ESA Life Sciences Meeting, 2019*. – DOI: 10.3389/conf.fphys.2018.26.00026
- [40] Cardiovascular Response as a Marker of Environmental Stress Caused by Variations in Geomagnetic Field and Local Weather / R.Y. Pishchalnikov, Y.I. Gurfinkel, R.M. Sarimov [et al.] // *Biomed Signal Process Control*. – 2019. – Vol. 51. – P. 401–410. – DOI: 10.1016/j.bspc.2019.03.005
- [41] Vasin, A.L. The Influence of an Artificial Periodic Geomagnetic Field in the Millihertz Range on the Parameters of Heart Rate Variability / A.L. Vasin, A.V. Shafirkin, Yu.I. Gurfinkel // *Aerospace and Environmental Medicine*. – 2019. – Vol. 53, No 6. – P. 62–69. – DOI: 10.21687/0233-528X-2019-53-6-62-69