

<https://doi.org/10.47183/mes.2024-26-3-57-64>

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЧЕЛОВЕКА В ИЗМЕНЕННЫХ МАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

Г.В. Ковров, О.В. Попова[✉], А.Г. Черникова, О.И. Орлов

Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем Российской академии наук, Москва, Россия

Введение. В связи с тем что в ближайшем будущем планируются космические полеты за пределы околоземной орбиты, становится актуальным изучение воздействия сниженного магнитного поля Земли на человека.

Цель. Оценка особенностей сенсомоторных реакций, качества ночного сна и развития дневной сонливости при 24-часовом пребывании в гипомагнитных условиях.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проведены в 2023 г. с участием 6 мужчин-добровольцев в возрасте от 26 до 37 лет. Были проведены 4 экспериментальные серии длительностью 24 ч каждая. В трех группах испытуемые подвергались воздействию гипомагнитных условий (в пределах 0,05–0,14 мкТл), в группе плацебо не было воздействия. В качестве методов исследования применялись анкетирование (по качеству и особенностям ночного сна и дневного бодрствования) и оценка особенностей сенсомоторных функций.

Результаты. Установлено, что в гипомагнитных условиях усиливается дневная сонливость в 66% наблюдений по сравнению с 33% случаев в серии с плацебо ($p = 0,003$). Сразу после прекращения экспериментального воздействия наблюдалась быстрая активация центральной нервной системы, что выражалось в статистически значимом снижении общего времени зритально-моторной реакции.

Выводы. В гипомагнитных условиях сохраняется работа мозговых механизмов сна. В дневное время в гипомагнитных условиях развивается сонливость, что указывает на возможность изменения циркадианной ритмики в активирующих системах головного мозга. Сразу после прекращения действия гипомагнитных условий происходит быстрая активация центральной нервной системы, имеющая компенсаторный характер. Выявленные особенности влияния гипомагнитных условий на цикл сна–бодрствования и сенсомоторные функции предполагают проведение дальнейших исследований дневной сонливости с использованием дополнительных субъективных и объективных методов оценки уровня бодрствования и активности центральной нервной системы.

Ключевые слова: сенсомоторные функции; гипомагнитные условия; простая зритально-моторная реакция; анкетная самооценка; ночной сон; дневная сонливость

Для цитирования: Ковров Г.В., Попова О.В., Черникова А.Г., Орлов О.И. Психофизиологическое состояние человека в измененных магнитных условиях. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2024;26(3):57–64. <https://doi.org/10.47183/mes.2024-26-3-57-64>

Финансирование: работа была выполнена в рамках базовой тематики РАН FMFR-2024-0042.

Соответствие принципам этики: Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены биоэтической комиссией федерального государственного бюджетного учреждения науки «Государственный научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем» РАН (Москва) (протокол № 641 от 14.06.2023). Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Попова Ольга Владимировна olya.popovaolga2710@yandex.ru

Статья поступила: 27.05.2024 **После доработки:** 02.09.2024 **Принята к публикации:** 07.09.2024

THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL STATE OF A PERSON IN ALTERED MAGNETIC CONDITIONS

Gennady V. Kovrov, Olga V. Popova[✉], Anna G. Chernikova, Oleg I. Orlov

State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Introduction. Due to the fact that manned space flights beyond Earth orbit are planned in the near future, it becomes relevant to study the effects of the Earth's reduced magnetic field on humans.

Objective. To evaluate the features of sensorimotor reactions, quality of night sleep (nocturnal sleep) and the development of daytime sleepiness during a 24-hour stay under hypomagnetic conditions (HMC).

Materials and methods. Experimental studies with the participation of 6 male volunteers aged 26 to 37 years were conducted in 2023. In total, four experimental series were carried out, lasting 24 hours each. The subjects were exposed to hypomagnetic conditions in three groups (the average value was between 0.05–0.14 µT). There was no exposure to such conditions in the placebo group.

The research methods included questionnaires regarding the quality and characteristics of night sleep, daytime wakefulness, as well as the study of sensorimotor functions. Statistical processing was carried out by the Statistica 13.0 software package.

Results. Daytime sleepiness was found to increase under hypomagnetic conditions in 66% of observations as compared to 33% of cases in the placebo series ($p=0.003$). Immediately following the cessation of experimental exposure, a rapid activation of the central nervous system was observed, which was expressed in a statistically significant decrease in the total visual-motor reaction time.

Conclusions. Under hypomagnetic conditions, the work of brain sleep mechanisms is preserved. Daytime drowsiness that develops under hypomagnetic conditions indicates the possibility of changes in circadian rhythmicity in brain activating systems. The rapid activation of the central nervous system reported immediately following the termination of hypomagnetic conditions has a compensatory character. The revealed features of hypomagnetic conditions influence on the sleep-wake cycle and sensorimotor functions suggest further studies of daytime sleepiness using additional subjective and objective methods of wakefulness level and activity of the central nervous system assessment.

Keywords: sensorimotor functions; hypomagnetic conditions; simple visual-motor reaction; questionnaire self-assessment; night sleep; daytime drowsiness

For citation: Kovrov G.V., Popova O.V., Chernikova A.G., Orlov O.I. The psychophysiological state of a person in altered magnetic conditions. *Extreme Medicine*. 2024;26(3):57–64. <https://doi.org/10.47183/mes.2024-26-3-57-64>

Funding: the study was conducted within the framework of the RAS basic theme FMFR-2024-0042.

© Г.В. Ковров, О.В. Попова, А.Г. Черникова, О.И. Орлов, 2024

Compliance with ethical principles: All studies were conducted in accordance with the principles of biomedical ethics formulated in the 1964 Declaration of Helsinki and its subsequent updates and approved by the Bioethics Commission of the Federal State Budgetary Institution of Science of the State Scientific Center of the Russian Federation — Institute of Medical and Biological Problems of the Russian Academy of Sciences (Moscow) (Protocol No.641 of 14.06.2023). Each participant in the study provided voluntary written informed consent signed by him/her after being informed of the potential risks and benefits, as well as the nature of the forthcoming study.

Potential conflict of interest: authors declare that there is no conflict of interest.

✉ Olga V. Popova olya.popovaolga2710@yandex.ru

Received: 27.05.2024 Revised: 02.09.2024 Accepted: 07.09.2024

ВВЕДЕНИЕ

Гипомагнитные условия (ГМУ) космического пространства, а также Луны и Марса, представляют собой критическую проблему для здоровья и работоспособности космонавтов во время длительных межпланетных полетов. Экспериментальные работы, посвященные изучению влияния ГМУ на человека, показали снижение резервов организма из-за возникновения проблем со здоровьем, таких как нарушения сна, изменения обмена веществ, а также появление неврологических нарушений [1]. Формирование режима труда и отдыха в соответствии с физиологическими возможностями человека, находящегося в ГМУ, позволит повысить эффективность его адаптации и выполнения поставленных перед ним задач.

Несмотря на обилие и разнообразие эмпирических данных, механизмы, лежащие в основе магниторецепции, до сих пор не идентифицированы. На сегодняшний день существует множество гипотез, например модель радикальных пар и модель магниторецепции, ключевым звеном которой является магнетит (оксид железа). Ослабление магнитного поля является стрессорным фактором для организма, при формировании организменной стресс-реакции важнейшую регуляторную функцию выполняет нервная система [2]. Было высказано предположение, что стрессорная реакция и седативный эффект медленных магнитных колебаний являются двумя видами чувствительности нервной системы человека к магнитному полю Земли. При изучении реакций нервной системы при воздействии электромагнитных полей была обнаружена неспецифическая реакция мозговых клеток, сопровождающаяся торможением условно-рефлекторной деятельности, процессов обучения и памяти. Стоит отметить, что реакция клеток напоминала адаптивный синдром Селье [3].

Согласно биоэтическим нормам большинство экспериментальных исследований эффектов ГМУ проводятся на животных. Было установлено, что длительное отсутствие магнитного поля значительно снижает способность к адаптации [4]. Воздействие ГМУ значительно ухудшает нейрогенез и когнитивные функции гиппокампа взрослых мышей за счет снижения эндогенных уровней аминофенилмасляной кислоты (АФК) в нервных стволовых клетках [5]. Как показали исследования, в ГМУ отмечается нарушение норадренергической активности в стволе мозга золотистых хомяков, поскольку после длительного пребывания в оклонулевой магнитной среде значительно снижается как содержание норадреналина, так и плотность норадреналин-иммунопозитивных нейронов [6]. Изучение длительного воздействия ГМУ показало, что животные тратят относительно больше времени

на изучение нового объекта и его местоположения в пространстве. B.F. Zhang и др. предполагают, что воздействие ГМУ нарушает пространственную и когнитивную память мышей [5]. Кроме того, в связи с отсутствием естественных магнитных условий были выявлены лейкопения, низкий уровень метаболизма, повышенная смертность и нарушение циркадианных ритмов [7]. Изменения циркадианного ритма и секреции мелатонина приводят к негативным последствиям в виде снижения антиоксидантной способности организма [8].

Влияние ГМУ на человека изучено меньше. Способность решать когнитивные тесты у человека ухудшается уже при 40-минутном пребывании в ГМУ [9], причем биологические эффекты ГМУ зависят от сложности задания. Максимальные эффекты наблюдались при выполнении сложных когнитивных тестов, где рост количества ошибок варьировал от $5,1 \pm 1,6$ до $7,4 \pm 2,5\%$ [10]. Результаты исследования В.Н. Бинги и др. [11] выявили значимые изменения в результатах когнитивных и сенсомоторных тестов: замедление скорости реакции, увеличение количества ошибок и снижение кратковременной памяти у мужчин, находившихся в «нулевом магнитном поле». Эксперимент Р.М. Саримова и др. [12] в двух режимах воздействия («плацебо» и «нулевое магнитное поле») длительностью 1 ч 17 мин (каждая серия с интервалом в 40–60 дней между сериями) показал, что «нулевое магнитное поле» вызывает увеличение количества ошибок и увеличение времени выполнения заданий в когнитивных тестах. Результаты когнитивных тестов в условиях «нулевого магнитного поля» снизились у 25 из 40 испытуемых.

Вегетативная регуляция сердечной деятельности также изменялась уже в первые 8 часов пребывания в ГМУ, преимущественно за счет отклонений в активности парасимпатической нервной системы [13]. Практически не изучены эффекты влияния ГМУ на развитие общей астении, усталости, сонливости, аффективных реакций и других возможных негативных психофизиологических состояний, которые создают угрозу развития аварийных ситуаций при операторской деятельности, способствуют нарушению взаимодействия в малых группах и усложняют деятельность, снижая эффективность выполнения целевых задач космического полета.

В 1976 г. Nakagawa описал возникновение многочисленных клинических и субклинических симптомов, связанных с ослаблением действия естественного геомагнитного поля Земли на человека, которые впоследствии получили название «синдром дефицита магнитного поля». При синдроме дефицита магнитного поля отмечаются потеря работоспособности, повышенная сонливость, нарушения ночного сна [14]. Можно предположить, что ГМУ, изменяя в цикле сон–бодрствование физиологическую

базу для оптимального функционирования, могут способствовать появлению дневной сонливости как состояния, ассоциированного с когнитивным дефицитом, и влиять на качество ночного сна, особенно его восстановительную функцию.

Количественная оценка влияния слабых магнитных полей на организм человека — один из самых дискутируемых вопросов современной магнито- и гелиобиологии. Поскольку в кратковременных экспериментах изменения магнитного поля часто не приводят к видимой реакции организма и существенному изменению физиологических процессов, актуальной проблемой является оценка длительного действия вариаций магнитного поля.

Цель работы — оценка особенностей сенсомоторных реакций, качества ночного сна и развития дневной сонливости при 24-часовом пребывании в гипомагнитных условиях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование ГМУ проводилось в ограниченном объеме методом компенсации естественного магнитного поля Земли системой обмоток с током (колец Гельмгольца), суммарный вектор магнитного поля которых направлен в противоположном направлении геомагнитного поля Земли (стенд «Арфа» (ИМБП)).

Установка «Арфа» предназначена для моделирования ГМУ на основе метода компенсации естественного геомагнитного поля (ГМП), при котором суммарный вектор МП колец Гельмгольца направлен в противоположную сторону по отношению к магнитному полю Земли. За счет специально подобранных диаметра колец и их расположения внутри камеры создается равномерно распределенное по значению и направлению магнитное поле. Система позволяет компенсировать изменения магнитного поля вдоль вертикальной компоненты, параллельной максимальному размеру блока экспозиции.

В результате индукция магнитного поля в рабочем объеме подвижного бокса блока экспозиции может достигать нулевых и отрицательных значений (обратное направление вектора ГМП). Контроль за показателями магнитного поля осуществляли с помощью трехкомпонентного датчика FL3-100 (Stefan Mayer Instruments, Германия) [13].

В эксперименте участвовали 6 здоровых добровольцев-мужчин в возрасте от 26 до 37 лет (ИМТ $24,77 \pm 2,99$). Все участники исследования проходили медицинское освидетельствование до начала эксперимента, были признаны здоровыми и не имеющими противопоказаний для участия в эксперименте. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены биоэтической комиссией федерального государственного бюджетного учреждения науки «Государственный

научный центр Российской Федерации — Институт медико-биологических проблем» РАН (Москва) (протокол № 641 от 14.06.2023). Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования. Исследование было контролируемым, рандомизированным двойным слепым плацебо. Каждый испытуемый участвовал в 4-х экспериментальных сериях, где в одной не было воздействия ГМУ, в трех других создавались ГМУ со снижением естественного магнитного поля (среднее значение $0,05\text{--}0,14$ мкГл). Таким образом, были выделены 2 экспериментальные группы: «Плацебо» ($n = 6$) и «ГМУ» ($n = 18$). Каждая экспериментальная серия включала 3 сессии (табл. 1).

Исследования сенсомоторной реакции выполнялись вне экспериментальной установки в первые 10 мин после окончания 3-й сессии.

Методы исследования включали:

1. Для выявления особенностей сна и бодрствования был использован разработанный ранее оригинальный структурированный опросник: испытуемые отвечали на вопросы, связанные с циклом «сон–бодрствование». Полное описание анкеты было опубликовано ранее [15]. В данном исследовании анализировались ответы на следующие вопросы: появление дневной сонливости (да/нет), появление дневного сна (да/нет, сколько раз за день); время отбоя и подъема (астрономическое время, час) длительность засыпания (мин), количество и длительность ночных пробуждений (мин).

2. Изучение простой зрительно-моторной реакции (ПЗМР) для оценки сенсомоторных функций в течение 10 мин после 3-й (дневной) сессии с ГМУ вне экспериментальной установки. Тест проводился на аппаратно-программном комплексе, разработанном в Институте медико-биологических проблем. Тест состоял из 11 предъявлений на экране монитора стимула в виде круга диаметром около 2,5 см. Испытуемый в ожидании появления стимула должен был удерживать курсор в другой области экрана монитора, ограниченной квадратом со стороной также около 2,5 см. При появлении стимула требовалось как можно быстрее переместить курсор из места его расположения в область круга и выполнить щелчок левой кнопкой мыши. По результатам 11 реакций на стимул вычислялись значения среднего и стандартного отклонения времени от начала появления стимула до начала движения курсора (t_1 , сенсорный компонент реакции), от начала движения курсора до помещения его в круг (t_2 , моторный компонент реакции) и от появления стимула до нажатия на кнопку мыши внутри круга (t_3 , общее время реакции).

Статистическая обработка осуществлялась с помощью пакета программного обеспечения Statistica 13.0 с использованием непараметрического критерия Манна — Уитни, сводных таблиц (banner tables), критерия

Таблица 1. Экспериментальные сессии (8-часовые) в сериях исследований

Экспериментальные сессии и исследования в них					
1-я сессия (дневная) в установке «Арфа» 12:00–20:00	Перерыв, вне установки «Арфа» 20:00–23:00	2-я сессия (ночная) в установке «Арфа» 23:00–7:00	Перерыв, вне установки «Арфа» 7:00–10:00	3-я сессия (дневная) в экспериментальной установке 10:00–18:00	После окончания сессии вне установки «Арфа», 18:00–18:10
	Анкетирование ($n = 24$)			Анкетирование ($n = 24$)	ПЗМР ($n = 24$)

Таблица подготовлена авторами по собственным данным

знаков и дисперсионного анализа. Значения количественных показателей приводятся в виде средних значений и ошибок среднего. Особенностью исследования являлось то, что при достаточном числе показателей количество испытуемых было ограничено ($n = 6$) из-за особенностей организации эксперимента. В работе использованы статистические методы, приемлемые для малых выборок [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Качество сна. Анализ латентного периода сна (скорости ночного засыпания) показал, что значимых патологических отклонений в обеих экспериментальных группах обнаружено не было. Удлинение времени засыпания более одного часа было выявлено в 1 случае за 6 ночей в условиях плацебо и в двух случаях за 18 ночей в условиях воздействия ГМУ. Длительность засыпания от 15 до 30 мин в условиях ГМУ была выявлена в 6 случаях за 18 ночей, а в условиях плацебо — в одном случае за 6 ночей (табл. 2).

Эти результаты указывают на схожие реакции длительности засыпания как в условиях плацебо, так и при воздействии ГМУ. Относительная представленность случаев более длительного засыпания (более 15 мин) несколько выше в группе с ГМУ (рис. 1), хотя различия и не достигают уровня статистической значимости.

В период ночного сна при воздействии ГМУ был отмечен один случай пробуждения за 18 ночей, в условиях плацебо регистрировали аналогичную картину за 6 ночей, что также указывает на отсутствие различий в экспериментальных группах по представленности нарушений ночного сна.

Таким образом, по показателям длительности засыпания и количеству ночных пробуждений патологических отклонений при воздействии ГМУ обнаружено не было.

Таблица 2. Длительность засыпания в экспериментальных группах

Условия	Засыпание меньше 15 мин	Засыпание 15–30 мин	Засыпание более 1 ч	Всего
	число случаев			
Плацебо	4	1	1	6
ГМУ	10	6	2	18
Все серии	14	7	3	24

Таблица подготовлена авторами по собственным данным

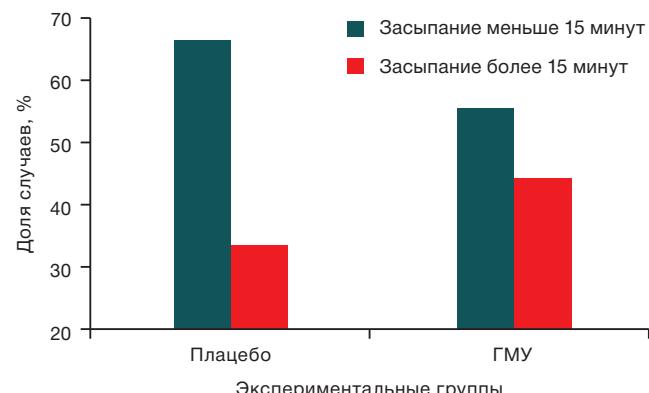


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 1. Распределение значений длительности засыпания в экспериментальных группах

Дневная сонливость. При сравнении частоты возникновения эпизодов дневной сонливости и/или ее отсутствия в условиях воздействия ГМУ и плацебо выявлено возрастание уровня дневной сонливости при влиянии ГМУ в 72% наблюдений ($p = 0,003$ по критерию знаков) по сравнению с группой плацебо. Соответствующие данные представлены на рисунке 2.

Повышение дневной сонливости характеризовалось появлением дневного сна в обеих экспериментальных группах. Однако повышение дневной сонливости при воздействии ГМУ не сопровождалось учащением эпизодов дневного сна по сравнению с условиями плацебо. Данные представлены в таблице 3.

Однократные дневные засыпания отмечались в 4 случаях в группе воздействия ГМУ и один раз в группе плацебо, двукратный дневной сон был зарегистрирован 11 раз в группе воздействия ГМУ и 4 раза в условиях плацебо. В обеих экспериментальных группах в 59% наблюдений дневных дремотных состояний или дневного сна не отмечалось.

Сенсомоторные функции при прекращении действия ГМУ. При оценке влияния окончания воздействия ГМУ на сенсомоторные функции в тесте ПЗМР установлено, что время реакции t_1 , t_2 и t_3 в группе плацебо составило соответственно $342,4 \pm 52,9$, $455,1 \pm 82,5$ и $632,5 \pm 104,6$ мс, а после окончания воздействия ГМУ — $336,2 \pm 44,1$, $433,9 \pm 64,1$, $596,0 \pm 86,8$ мс.

Изучение динамики выполнения теста ПЗМР (рис. 3) показало, что после нахождения в ГМУ значение общего времени выполнения задания (t_3) (кроме 9-го предъявления) в группе воздействия ГМУ было статистически значимо ниже по критерию знаков: $M = 590,5$ мс ($Q25 = 585,7$ мс, $Q75 = 607,8$ мс) против $M = 644,0$ мс ($Q25 = 618,8$ мс; $Q75 = 649,7$ мс) после плацебо.

Анализируя отдельные компоненты выполнения теста ПЗМР, а именно время от начала предъявления стимула

Таблица 3. Эпизоды дневного сна в условиях плацебо и ГМУ

Частота возникновения нарушений сна (дремота) за день	Группы исследования	
	Плацебо	ГМУ
Отсутствует	7	21
Однократно	1	4
Двукратно	4	11
Всего наблюдений	12	36

Таблица подготовлена авторами по собственным данным

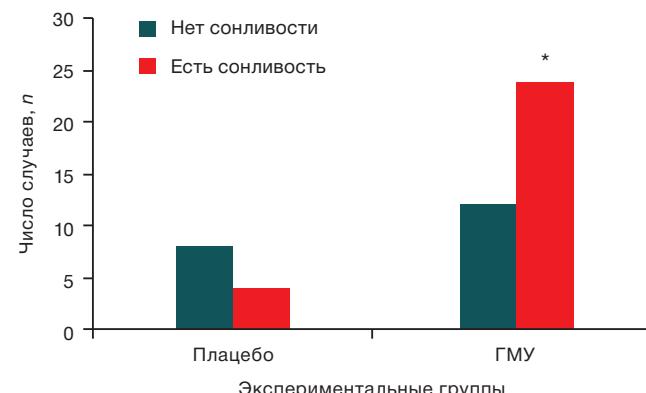


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 2. Наличие дневной сонливости в условиях плацебо и ГМУ
Примечание: * $p = 0,003$.

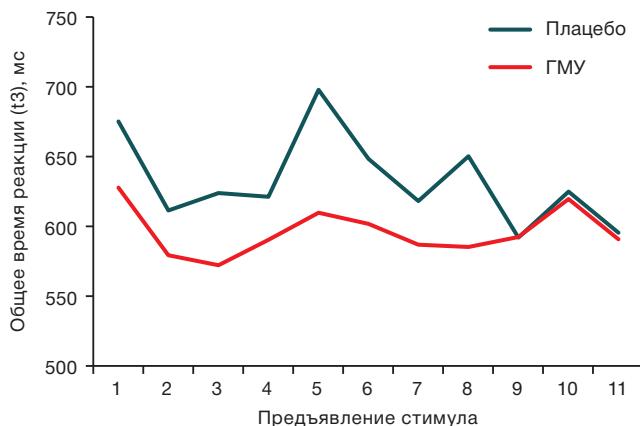


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 3. Время ПЗМР при последовательном предъявлении стимулов после окончания сессий с ГМУ и плацебо

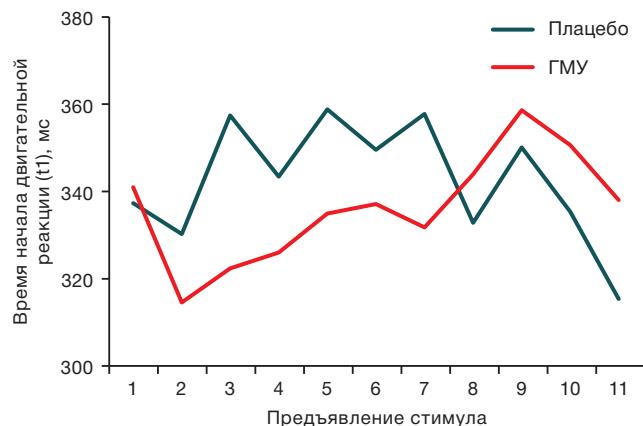


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 4. Время начала двигательной реакции (t1) при последовательном предъявлении стимулов после окончания сессий ГМУ и плацебо

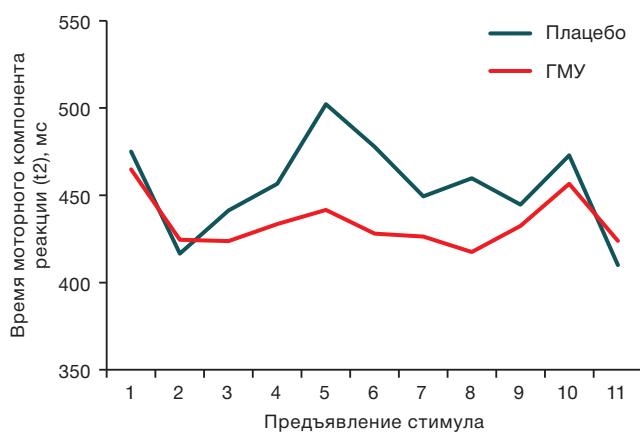


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 5. Время движения курсора до стимула (t2) при последовательном предъявлении стимулов после сессий ГМУ и плацебо

до начала движения (сенсорный компонент реакции — t1) с 2-го по 7-е предъявление, было отмечено уменьшение показателя у испытуемых после воздействия ГМУ: $M = 328,8$ мс ($Q25 = 323,2$ мс, $Q75 = 334,1$ мс) по сравнению с плацебо: $M = 353,4$ мс ($Q25 = 344,9$ мс, $Q75 = 357,6$ мс). Данные представлены на рисунке 4.

Время перемещения курсора из квадрата до стимула — моторный компонент реакции (t2) с 3-го ответа по 10-й — в группе воздействия ГМУ оказался ниже: $M = 430,3$ мс ($Q25 = 425,7$ мс, $Q75 = 435,5$ мс) по сравнению с аналогичным показателем группы плацебо: $M = 458,1$ мс ($Q25 = 448,2$ мс, $Q75 = 474,1$ мс). При статистической обработке данных с использованием критерия знаков отмечено ускорение времени реакции в 9 из 11 предъявлений ($p < 0,05$). Данные представлены в рисунке 5.

Дневная сонливость в ГМУ и сенсомоторные функции при прекращении их действия. Учитывая выявленное нами более частое появление дневной сонливости в условиях ГМУ, было проведено сравнение времени реакции при выполнении ПЗМР в случаях, где в прошедшей сессии регистрировались эпизоды дневной сонливости и где ее не было. Анализ проводили с использованием непараметрического критерия Манна — Уитни. После воздействия ГМУ у испытуемых с выявленной дневной сонливостью время реакции было меньше, чем у испытуемых, подвергшихся воздействию ГМУ, у которых не регистрировали эпизоды сонливости. После плацебо-сессий

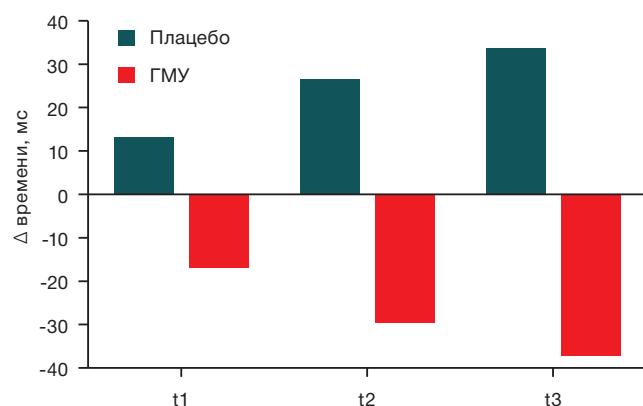


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 6. Сенсомоторные функции в группах с наличием и отсутствием дневной сонливости после условий плацебо и ГМУ

Примечание: Δ — разность между значениями после сессии без дневной сонливости и с наличием дневной сонливости

у испытуемых с выявленной дневной сонливостью время ПЗМР, напротив, увеличивалось по сравнению с данными испытуемых из группы плацебо, у которых не наблюдалась сонливость. Данные представлены на рисунке 6.

Дисперсионный анализ ($F = 22,6$, $p < 0,05$) был проведен для оценки изменений показателей t1, t2, t3 для групп с зарегистрированной сонливостью после воздействия ГМУ и плацебо. На рисунке 7 отражено статистически значимое снижение времени сенсомоторной реакции сразу после окончания нахождения в экспериментальной установке в сериях воздействия ГМУ по сравнению с плацебо.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В нашем исследовании выявление дневной сонливости было основано на самоотчете здоровых добровольцев, которые оценивали наличие сонливости ретроспективно после окончания экспериментальных сессий. Этот подход оказался информативным и позволил обнаружить, что субъективная дневная сонливость в условиях ГМУ усиливается по сравнению с плацебо. Основными причинами дневной сонливости у здоровых лиц в большинстве случаев являются недостаток предшествующего ночного сна и состояние утомления [17]. Появление дневного

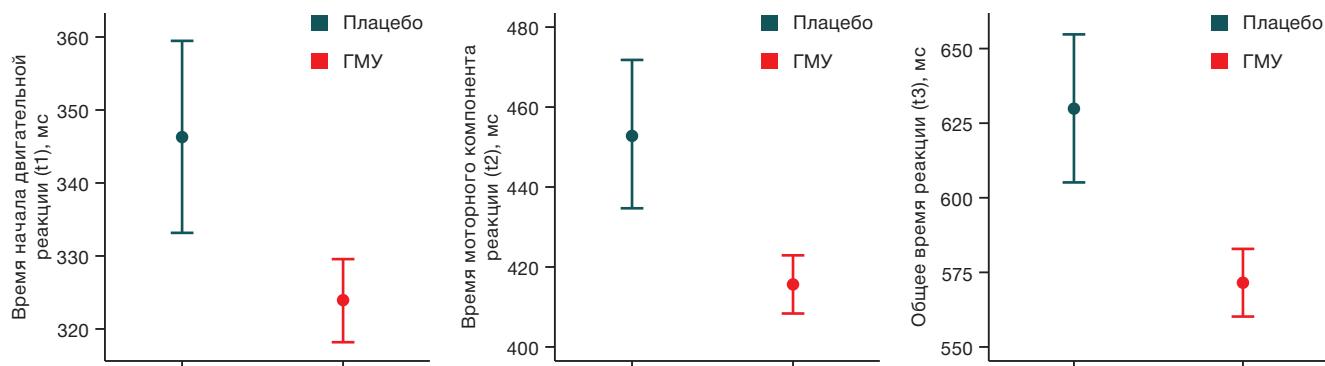


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 7. Результаты дисперсионного анализа показателей ПЗМР для группы с дневной сонливостью в условиях плацебо и ГМУ

сна и сонливости, сочетающихся с сокращением продолжительности ночного сна, характерно для условий изоляции и АНОГ [18, 19], которые моделируют действие некоторых факторов космического полета. В исследованиях В.Ю. Куканова и др. на основании изменений соотношений сумм дельта- и тета-диапазонов к сумме альфа- и бета-диапазонов электроэнцефалограммы отмечался сдвиг активности мозга в сторону процессов торможения, что может быть свидетельством развития утомления [13]. При этом нами не было выявлено как сокращения длительности предшествующего ночного сна, так и удлинения времени засыпания и учащения ночных пробуждений, то есть снижения качества сна. Это, вероятно, свидетельствует об иных причинах возникновения дневной сонливости, в частности о гипногенном эффекте сниженного магнитного поля.

Дневная сонливость представляет собой сложный симптомокомплекс, состоящий из ощущения желания спать, проявлений снижения физической и психической активности. Это может создавать риски развития аварийных ситуаций. Важно отметить, что сонливость не является стационарным состоянием: она может быть выраженной и малозаметной, появляться и исчезать в зависимости от разных внешних и внутренних факторов, приводить к неожиданным засыпаниям. Механизмы развития дневной сонливости в гипомагнитных условиях недостаточно изучены. Опираясь на выявленное ранее у животных падение уровня норадреналина в условиях воздействия ГМУ [6], можно предположить, что у человека вероятное снижение уровня норадреналина, ацетилхолина, серотонина, дофамина и других нейромедиаторов, активность которых тесно связана с циклом «сон–бодрствование», является нейрохимической основой развития сонливости в ГМУ.

Появление дневного сна и дремотных состояний может отражать степень выраженности сонливости и усталости, приводить к ошибкам в операторской деятельности [17, 20]. Наше исследование показало, что при действии ГМУ у испытуемых состояния сонливости возникают значительно чаще, чем в серии с плацебо. Эпизоды дневного сна у них отмечались только при развитии сонливости, что свидетельствует не только о более частом, но и более значимом нарушении цикла «сон–бодрствование» [21, 22], чем у испытуемых из группы плацебо. Учитывая факт, что дневные засыпания представляют собой самостоятельную проблему в медицине, связанную с нейрохимическими изменениями в выработке орексина, можно предположить,

что при ГМУ, вероятно, страдает и орексиновая система поддержания бодрствования [23].

В проведенной работе было показано, что сразу после окончания сессии воздействия ГМУ состояние человека становится более активным, чем после сессии плацебо. В первые минуты после возобновления действия геомагнитного поля отмечается уменьшение времени реакции при выполнении теста ПЗМР, что является интересным феноменом, отражающим способность мозговых систем быстро повышать нейротрансмиттерную активность [23]. Биологические эффекты восстановления естественного уровня геомагнитного поля мало изучены. В исследованиях на животных [24] было показано, что 8-дневное пребывание животных в гипомагнитной среде (по 30 мин в день) приводило к активации функции надпочечников через один час после прекращения ГМУ. Результаты нашего исследования могут отражать такие изменения, поскольку усиление выработки гормонов надпочечников напрямую связано с улучшением состояния ЦНС и ускорением реакции. Тогда как 30-дневное пребывание в ГМУ приводило к снижению функции надпочечников, поэтому вопрос о стимулирующем эффекте восстановления естественного магнитного поля остается открытым и требует дальнейшего изучения.

Есть вероятность, что нахождение человека в сонливом состоянии играет роль своеобразного «предохранителя» при адаптации нервной системы к воздействию ГМУ, а восстановление магнитного поля позволяет мозгу быстро перейти в активное состояние. Если эта гипотеза подтвердится, то условия ГМУ можно будет рассматривать как способ перевода организма на уровень функционирования, граничный между сном и бодрствованием, где снижение когнитивных способностей является предохранительной реакцией. В этой ситуации необходимо исследовать и разрабатывать безопасные режимы труда и отдыха для лиц, находящихся в гипомагнитных условиях. Снижение магнитного поля можно рассматривать также как вспомогательный способ «hibernation» мозговой активности, что полезно знать при полетах в дальнее космическое пространство. В земных условиях гипомагнитные установки можно применять в практике нейрореанимации при необходимости снижения мозговой активности или при реабилитации после стрессовых воздействий. Восстановление естественного магнитного поля, способствующего быстрому повышению мозговой активности, можно рассматривать как естественный стимулятор когнитивной деятельности.

ВЫВОДЫ

1. В период ночного сна субъективная скорость засыпания и частотаочных пробуждений в ГМУ не меняются, что предполагает сохранность в работе мозговых механизмов сна.
2. В дневное время развивается сонливость в ГМУ, что указывает на возможность изменения циркадианной ритмики в активирующих системах головного мозга. Сразу после прекращения действия ГМУ происходит

быстрая активация ЦНС, оцененная по параметрам сенсомоторной реакции, компенсаторный характер которой требует подтверждения.

3. Дальнейшие исследования с использованием больших выборок, расширенным набором методов, изучением отсроченных эффектов последействия ГМУ и «быстрых» эффектов восстановления нормального магнитного поля, вероятно, помогут оценить возможности использования ГМУ в терапии и профилактике нейролегенеративных и постстрессовых нарушений.

Литература / References

1. Xue X, Ali YF, Luo W, Liu C, Zhou G, Liu NA. Biological Effects of Space Hypomagnetic Environment on Circadian Rhythm. *Front. Physiol.* 2021;12:643943. <https://doi.org/10.3389/fphys.2021.643943>
2. Никитина ЕА, Васильева СА, Щеголов БФ, Савватеева-Попова ЕВ. Слабое статическое магнитное поле: воздействие на нервную систему. *Журнал высшей нервной деятельности*. 2022;72(6):783–99.
Nikitina EA, Vasilyeva SA, Shchegolev BF, Savvatieva-Popova EV. Weak static magnetic field: Effects on the nervous system. *Journal of Higher Nervous Activity*. 2022;72(6):783–99 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0044467722060077>
3. Карпин ВА, Костюкова НК. Влияние слабых магнитных полей на высшую нервную деятельность. *Байкальский медицинский журнал*. 2004;46(5):7–11.
Karpin VA, Kostyukova NK. The influence of weak magnetic fields on higher nervous activity. *Baikal Medical Journal*. 2004;46(5):7–11 (In Russ.).
4. Tian L, Luo Y, Zhan A, Ren J, Qin H, Yongxin Pan. Hypomagnetic Field Induces the Production of Reactive Oxygen Species and Cognitive Deficits in Mice Hippocampus. *Int J Mol Sci.* 2022;23(7):3622. <https://doi.org/10.3390/ijms23073622>
5. Zhang BF, Wang L, Zhan AS, Wang M, Tian LX, Guo WX, Pan YY. Long-term exposure to a hypomagnetic field attenuates adult hippocampal neurogenesis and cognition. *Nat. Commun.* 2021;(12):1174. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21468-x>
6. Zhang X, Li J F, Wu Q J, Li B, Jiang JC. Effects of hypomagnetic field on noradrenergic activities in the brainstem of golden hamster. *Bioelectromagnetics*. 2007;28:155–8. <https://doi.org/10.1002/bem.20290>
7. Wang X, Jing C, Selby C P, Chiou Y Y, Yang Y, Wu W et al. Comparative properties and functions of type 2 and type 4 pigeon cryptochromes. *Cell Mol. Life Sci.* 2018;(75):4629–41. <https://doi.org/10.1007/s00018-018-2920-y>
8. Jia B, Xie L, Zheng Q, Yang PF, Zhang WJ, Ding C, et al. A hypomagnetic field aggravates bone loss induced by hindlimb unloading in rat femurs. *PLoS One*. 2014;9:e105604. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105604>
9. Sarimov RM, Birhi VN, Milyaev, VA. The influence of geomagnetic field compensation on human cognitive processes. *Biophysics*. 2008;53(5):433–41. <https://doi.org/10.1134/S0006350908050205>
10. Birhi VN, Sarimov RM. Zero Magnetic Field Effect Observed in Human Cognitive Processes. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2009;28(3):310–5. <https://doi.org/10.3109/15368370903167246>
11. Бинги ВН, Миляев ВА, Саримов РМ, Зарутский АА. Влияние электростатического и “нулевого” магнитного полей на психофизиологическое состояние человека. *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. 2006;8(9):48–58.
Bingi VN, Milyaev VA, Salimov RM, Zarutsky AA. The influence of electrostatic and “zero” magnetic fields on the psychophysiological state of a person. *Biomedical technologies and radio electronics*. 2006;8(9):48–58 (In Russ.).
EDN: HVNYQN
12. Sarimov RM, Birhi VN, Milyaev VA. The Influence of Geomagnetic Field Compensation on Human Cognitive Processes. *Biofizika*. 2008;53(5):856–66. <https://doi.org/10.1134/S0006350908050205>
13. Куканов В Ю, Васин А Л, Демин А В, Счастливцева Д В, Бубеев ЮА, Суворов АВ. и др. Влияние моделируемых гипомагнитных условий на некоторые физиологические показатели при 8-часовой экспозиции. эксперимент «АРФА-19» *Физиология человека*. 2023;49(2):54–64.
Kukanov VYu, Vasin AL, Demin AV, Schastlivtseva DV, Bubelev YuA, Suvorov AV et al. Effect of Simulated Hypomagnetic Conditions on Some Physiological Parameters under 8-Hour Exposure. Experiment Arfa-19. *Hum Physiol.* 2023;49:138–46 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0131164622600343>
14. Nakagawa K. Magnetic Field Deficiency Syndrome and Magnetic Treatment. *Japan Medical Journal*. 1976;2745.
15. Kovrov ГВ, Власова АВ, Попова ОВ, Черникова АГ. Изменение паттерна нарушений сна у здоровых людей в условиях 21-суточной антиортостатической гипокинезии. *Acta Biomedica Scientifica*. 2023;8(6):241–8.
Kovrov GV, Vlasova AV, Popova OV, Chernikova AG. Changes in the pattern of sleep disorders in healthy people under conditions of 21-day antiorthostatic hypokinesia. *Acta Biomedica Scientifica*. 2023;8(6):241–248 (In Russ.). <https://doi.org/10.29413/ABS.2023-8.6.24>
16. Носовский АМ, Попова ОВ, Смирнов ЮИ. Современные технологии статистического анализа медицинских данных и способы их графического представления. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2023;57(5):149–54.
Nosovsky AM, Popova OV, Smirnov Yul. Modern technologies of statistical analysis of medical data and methods of their graphical representation. *Aerospace and environmental medicine*. 2023;57(5):149–54 (In Russ.). <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2023-57-5-149-154>
17. Roehrs T, Carskadon MA, Dement WC, Roth T. Daytime Sleepiness and Alertness, Principles and Practice of Sleep Medicine. Elsevier. 2017;4:9–48. [https://doi.org/10.1016/s0149-7634\(87\)80016-7](https://doi.org/10.1016/s0149-7634(87)80016-7)
18. Вейн АМ, Пономарева ИП, Елигулашвили ТС, Порохов СИ, Филимонов МИ, Полуэктов М.Г. Цикл «сон-бодрствование» в условиях антиортостатической гипокинезии. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 1997;1:47–52.
Vane AM, Ponomareva IP, Yeligulashvili T, Levin Yal, Kovrov GV, Filimonov MI. Features of the sleep-wake cycle during prolonged isolation. *Aerospace and environmental medicine*. 1997;31(4):36–41 (In Russ.).
19. Дорохов ВБ. Анализ психофизиологических механизмов нарушения деятельности при дремотных изменениях сознания. *Вестник РГНФ*. 2003;1(4):137–44.
Dorokhov VB. Analysis of the psychophysiological mechanisms of impaired activity during somnolent changes in consciousness. *Bulletin of the RGNF*. 2003;1(4):137–44 (In Russ.).
20. Путилов АА, Донская ОГ, Веревкин ЕГ, Арсен'ев ГН, Пучковая АН, Дороков ВБ, et al. Overlap between individual variation in personality traits and sleep-wake behavior. *Current Psychology*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12144-021-01495-z>

21. Шевцова КВ, Нодель МР, Качановский МС, Ковров ГВ, Яхно НН. Многофакторность дневной сонливости при болезни Паркинсона. *Бюллетень Национального общества по изучению болезни Паркинсона и расстройств движений*. 2022;2:223–6.
- Shevtsova KV, Nodel MR, Kachanovsky MS, Kovrov GV, Yakhno NN. Multifactorial daytime sleepiness in Parkinson's disease. *Bulletin of the National Society for the Study of Parkinson's Disease and Movement Disorders*. 2022;2:223–6 (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2226-079X-2022-12473>
22. Нодель МР, Шевцова КВ, Ковров ГВ, Яхно НН. Неожиданные засыпания у пациентов с болезнью Паркинсона. *Российский неврологический журнал*. 2022;27(1):62–8.
- Nodel MR, Shevtsova KV, Kovrov GV, Yakhno NN. Unexpected falling asleep in patients with Parkinson's disease. *Russian Neurological Journal*. 2022;27(1):62–8 (In Russ.). <https://doi.org/10.30629/2658-7947-2022-27-1-62-68>
23. Ковальzon VM. Современный взгляд на серотониновую теорию депрессии. *Российский неврологический журнал*. 2020;25(3):40–4.
- Kovalzon VM. A modern view on the serotonin theory of depression. *Russian Neurological Journal*. 2020;25(3):40–4 (In Russ.). <https://doi.org/10.30629/2658-7947-2020-25-3-40-44>
24. Шуст ИВ, Костиник ИМ. Реакции коры надпочечников животных на воздействие сильного постоянного МП и гипомагнитной среды. Проблемы эндокринологии. 1976;22(2):86–91.
- Shust IV, Kostin IM. Reactions of the adrenal cortex of animals to the effects of strong constant MP and hypomagnetic medium. *Problems of endocrinology*. 1976;22(2):86–91. PMID: 1273052

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: Г.В Ковров — написание статьи, анализ данных; О.В. Попова — написание статьи, сбор данных; А.Г. Черникова — написание статьи, анализ данных; О.И. Орлов — научный руководитель экспериментального исследования.

ОБ АВТОРАХ

Ковров Геннадий Васильевич, д-р мед. наук, профессор
<https://orcid.org/0000-0002-3564-6798>
kgv2006@yandex.ru

Попова Ольга Владимировна
<https://orcid.org/0009-0002-3749-588X>
olya.popovaolga2710@yandex.ru

Черникова Анна Григорьевна, канд. биол. наук
<https://orcid.org/0000-0002-2596-8929>
anna.impb@mail.ru

Орлов Олег Игоревич, д-р. мед. наук, академик РАН
<https://orcid.org/0000-0002-2174-3183>
orlov@imbp.ru