

ВЕГЕТАТИВНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ КРОВООБРАЩЕНИЯ И БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В МИОКАРДЕ ЧЕЛОВЕКА В МОДЕЛИРУЕМЫХ ГИПОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

О. В. Попова [✉], В. Б. Русанов, О. И. Орлов

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

На сегодняшний день становится актуальной перспектива длительных межпланетных полетов, поэтому необходимо понимание изменений в сердечно-сосудистой системе (ССС), которые будут происходить в гипомангнитных условиях. Целью исследования было провести анализ изменений механизмов ССС, которые представляют собой основу для формирования variability сердечного ритма и биоэлектрических процессов в миокарде, в условиях сниженного в 350, 650 и 1000 раз магнитного поля Земли. В эксперименте (2023 г.) участвовало 6 мужчин-добровольцев в возрасте 26–37 лет, у которых непрерывно в течение 32 ч регистрировали электрокардиограмму. Анализ полученных данных проводили при помощи кластерного и дисперсионного анализа. Было обнаружено, что у мужчин-добровольцев, относящихся к группе с преобладанием парасимпатических влияний, функционального резерва хватает для критических значений (воздействия сниженного магнитного поля до 1000 раз). У добровольцев с преобладанием симпатических моделирующих влияний поддержание приспособительных реакций осуществляется метаболическим регуляторным контуром. В этой группе реакция на воздействие сниженного магнитного поля достаточно выражена при пороге его снижения от 350 раз. Проведенный нами пилотный эксперимент, отражающий влияние сниженного магнитного поля земли на ССС, имеет определяющее значение для разработки концепции последующих экспериментальных воздействий, связанных с редукцией магнитного поля, для интересов космической физиологии и медицины.

Ключевые слова: гипомангнитные условия, сердечно-сосудистая система, биоэлектрические процессы, variability сердечного ритма, дисперсионное картирование

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

Вклад авторов: О. В. Попова — написание статьи, сбор и анализ данных; В. Б. Русанов — написание статьи, анализ данных; О. И. Орлов — научный руководитель эксперимента.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом ФГБУН ГНЦ РФ — ИМБП РАН (Москва) (протокол № 641 от 14 июня 2023 г.). Все участники подписали добровольное информированное согласие на исследование.

✉ **Для корреспонденции:** Ольга Владимировна Попова
Хорошевское шоссе, 76А, г. Москва, 123007, Россия; olya.popovaolga2710@yandex.ru

Статья получена: 22.05.2024 **Статья принята к печати:** 02.06.2024 **Опубликована онлайн:** 21.06.2024

DOI: 10.47183/mes.2024.019

VEGETATIVE REGULATION OF BLOOD CIRCULATION AND BIOELECTRIC PROCESSES IN THE HUMAN MYOCARDIUM UNDER SIMULATED HYPOMAGNETIC CONDITIONS

Popova OV [✉], Rusanov VB, Orlov OI

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

Today, the prospect of long-term interplanetary missions becomes relevant, that is why it is necessary to understand the changes in the cardiovascular system (CVS) that would occur in hypomagnetic environment. The study was aimed to assess the changes in the CVS mechanisms underlying formation of heart rate variability and bioelectric processes in the myocardium under conditions the 350-, 650-, and 1000-fold reduced Earth's magnetic field. The experiment (2023) involved 6 male volunteers aged 26–37 years, in whom electrocardiography was continuously performed throughout 32 h. The data obtained were assessed by cluster analysis and analysis of variance. It was found that male volunteers, who belonged to the group showing predominance of parasympathetic effects, had enough functional reserve for critical values (exposure to the up to 1000-fold reduced magnetic field). In volunteers showing predominance of sympathetic modulatory effects, the adaptive response maintenance was ensured by the metabolic regulatory circuit. In this group, the response to the reduced magnetic field exposure was quite pronounced at the threshold of its 350-fold reduction. Our pilot experiment reflecting the effect of the reduced Earth's magnetic field on the CVS is crucial for development of the concept of further experimental exposures related to magnetic field reduction benefiting space physiology and medicine.

Keywords: hypomagnetic conditions, cardiovascular system, bioelectric processes, heart rate variability, dispersion mapping

Funding: the study was conducted within the framework of the RAS core themes, FMFR-2024–0042.

Author contribution: Popova OV — manuscript writing, data acquisition and analysis; Rusanov VB — manuscript writing, data analysis; Orlov OI — scientific advisor for the experiment.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of the State Scientific Center of the Russian Federation — Institute for Biomedical Problems RAS (Moscow) (protocol No. 641 dated 14 June 2023). All subjects submitted the informed consent to study participation.

✉ **Correspondence should be addressed:** Olga V. Popova
Khoroshevskoye shosse, 76A, Moscow, 123007, Russia; olya.popovaolga2710@yandex.ru

Received: 22.05.2024 **Accepted:** 02.06.2024 **Published online:** 21.06.2024

DOI: 10.47183/mes.2024.019

Изменения геомагнитных условий (ГМУ), несомненно, влияют на живые организмы [1]. Каждая клетка биологической системы, встроенная в магнитные поля Солнца и Земли, постоянно подвергается воздействию их флуктуаций, охватывающих широкий диапазон частот [2].

В последние годы выполнены исследования, изучающие связь магнитной активности с биологическими

системами различных живых организмов. Они иллюстрируют влияние геомагнитной и Солнечной активности на различные физиологические ритмы, а также возможную синхронизацию между ними, например, воздействие геомагнитных возмущений на функции сердца и вегетативной нервной системы (ВНС) [3]. Подобные эффекты возникают, когда физиологические

системы человека подвергаются различным изменениям в геомагнитной динамике. Резонансы силовых линий геомагнитного поля, а также резонансы Шумана, возникающие в пространстве между поверхностью Земли и ионосферой, создают диапазон резонансных частот, которые непосредственно перекрываются с частотами человеческого мозга, ВНС и сердечно-сосудистой системы. Ритмы, вырабатываемые мозгом и сердцем, сильнее подвержены влиянию изменений геомагнитных условий, чем другие физиологические системы, изученные до сих пор [4].

С помощью искусственного моделирования геомагнитной бури показано, что геомагнитная активность может вызывать значительный сердечно-сосудистый ответ [5]. Более того, имеются данные, позволяющие предположить наличие связи между кратковременными геомагнитными возмущениями и числом смертей от сердечно-сосудистых заболеваний и инфаркта миокарда [6].

Наряду с этим, изменения геомагнитного поля (ГМП) могут модифицировать функциональное состояние сердечно-сосудистой системы (ССС), связанное с физиологическим процессом старения [7].

В ближайшем будущем открывается перспектива полетов в дальний космос, но остается открытым вопрос: как при межпланетном перелете редуцируется ГМП, которое в космосе в 10^3 – 10^5 раз меньше, чем ГМП Земли, будет влиять на физиологические системы человека? Кроме того, ГМУ станут неотъемлемой частью комплекса факторов, воздействующих на космонавтов в длительных межпланетных миссиях, за пределами магнитного поля Земли, и адаптация организма человека к ним будет затрагивать регуляторные процессы в различных физиологических системах.

Исследования, проведенные на животных, демонстрируют влияние сниженного ГМП на организм млекопитающих. После трехчасового пребывания мышей в ГМУ (коэффициенты ослабления ГМП 80–120, 300 и 1000 раз) были обнаружены нарушения циркуляции лимфы и крови. После шести часов экспозиции в ГМУ наблюдали изменения в структуре кардиомиоцитов. Активировался лизис миофибрилл в саркоплазматическом ретикулуме, саркоплазматического матрикса и матрикса митохондрий. Наблюдали также разрушение крист в митохондриях и увеличение везикул в гладком и шероховатом эндоплазматическом ретикулуме. В ГМУ нарушался или полностью подавлялся процесс биосинтеза белка в кардиомиоцитах. Все вышеописанное указывает на перестройки ультраструктурного уровня, сходные с апоптозом.

В исследованиях с участием человека влияние ГМП на тонус сосудистой стенки неоднократно подтверждали [8–11]. Его изменения, независимо от других геомагнитных климатических факторов, модулируют изменения артериального давления (АД). Было замечено, что геомагнитные бури, создаваемые солнечными вспышками [9], разбалансирующие адаптивные механизмы и вызывающие тяжелые адаптивные стрессовые реакции, влияют на механизмы регуляции ССС. Это проявляется в снижении вариабельности сердечного ритма (BCP) и кровотока, повышении агрегационной активности тромбоцитов, коагуляции и вязкости крови даже у здоровых людей [11, 12].

После изменения магнитной или солнечной активности физиологические процессы происходят с задержкой. Это явление называется «фазой задержки» и длится от нескольких часов до 2–3 дней после изменения ГМП

[10, 12, 13]. Отмечено, что сердечно-сосудистые заболевания значительно снижают чувствительность субъектов к изменениям ГМП, что может привести к критическим нарушениям здоровья [14].

Показано, что ГМУ влияют на капиллярный кровоток, артериальное давление и частоту сердечных сокращений (ЧСС), повышают активность парасимпатического сегмента регуляции сердечного ритма [15].

У восьми здоровых мужчин, находившихся в состоянии покоя, было проведено изучение гемодинамики методом непрерывного мониторинга показателей ССС (ЧСС, артериальное давление (АД), вегетативный индекс Кердо). Эксперимент проводили в течение восьми часов и в двух сериях наблюдений: в ГМУ (снижение индукции магнитного поля Земли в 1000 раз) и в условиях естественного магнитного поля Земли. Было выявлено снижение ЧСС (в среднем на 4 удара в мин) и АД по сравнению с контрольной группой. Причем систолическое АД понизилось в среднем на 16 мм рт. ст., а диастолическое АД уменьшилось на 16 мм рт. ст. Вегетативный индекс Кердо, наоборот, при восьмичасовом пребывании в ГМУ возрастал на 20% [16].

По результатам клинического обследования, у лиц, работавших длительное время в условиях сниженного в 3–10 раз ГМП, было обнаружено развитие в ведущих системах организма функциональных изменений: синдрома вегетативно-сосудистой дистонии, нарушения процесса реполяризации миокарда, гипертонической болезни, дистонии мозговых сосудов с наличием регуляторной межполушарной асимметрии, достоверного увеличения биологического возраста на 4,2 года по сравнению с календарным [17].

В связи с этим целью нашего исследования был анализ системных изменений в ССС, которые обусловлены механизмами, лежащими в основе формирования вариабельности сердечного ритма и отражающими регуляторный компонент этой физиологической системы, а также биоэлектрических процессов в сердечной мышце в условиях снижения МП различной кратности.

ПАЦИЕНТЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные исследования были проведены в 2023 г. на стендовой базе по моделированию магнитных полей «Арфа» ГНЦ РФ — ИМБП РАН, входящей в состав уникальной научной установки «Медико-технический комплекс для отработки инновационных технологий космической биомедицины в интересах обеспечения орбитальных и межпланетных полетов, а также развития практического здравоохранения» (рис. 1).

Конструкция системы моделирования магнитных полей «Арфа» и ее технические характеристики описаны ранее [18].

Циклограмма исследования представляла собой рандомизированное слепое четырехсерийное исследование. Перед началом каждой серии проводили фоновые исследования. Первая сессия — 8-часовое пребывание испытуемого в установке (утро–день), далее 3-часовой контролируемый перерыв. Вторая сессия — испытуемый находился в установке 8 ч (ночное время — сон), далее снова 3-часовой контролируемый перерыв. Третья сессия — испытуемого помещали в установку на 8 ч (дневное время) и далее выполняли исследования в периоде последствия в течение 3 ч (рис. 2).

В ходе экспериментального воздействия были проведены четыре 37-часовых серии, которые включали в себя фоновые исследования, нахождение в условиях ГМУ и

периоды последствия. В ГМУ ГМП снижали в 350, 650 и 1000 раз, а также была серия плацебо. Экспериментальное воздействие и плацебо были рандомизированы. Для адаптации испытуемого к неизвестным ему условиям пребывания в установке «Арфа», гипокинезии, а также методикам экспериментальной программы с каждым из них предварительно проводили 4-часовую тренировочную серию. Доброволец находился в установке «Арфа» в положении сидя с ограничением движений (не наклоняясь, не двигая руками в различных осях, не вставая).

В эксперименте с ГМУ участвовало 6 мужчин-добровольцев в возрасте от 26 до 37 лет, рост — 178 ± 7 см, вес — $76,5 \pm 15,5$ кг, индекс массы тела — $24,77 \pm 2,99$, у которых непрерывно в течение 32 ч регистрировали электрокардиограмму (ЭКГ). Критерии включения: все добровольцы прошли медицинское обследование и были допущены к участию в экспериментальных исследованиях врачебно-экспертной комиссией ГНЦ РФ — ИМБП РАН. Помимо прохождения врачебно-экспертной комиссии, за двое суток до начала АНОГ проводили медицинский осмотр, на основании которого испытуемые были допущены ответственным врачом к участию в экспериментальных исследованиях. Использовали регистратор ЭКГ «Космокард» (ГНЦ РФ — ИМБП РАН; Россия), разработанный для проведения исследований на Международной космической станции. ЭКГ регистрировали с размещенных на груди четырех электродов. Анализировали запись II отведения. Предварительно полученный ЭКГ-сигнал редактировали с использованием визуальных проверок и ручной коррекции отдельных интервалов RR. После этого он был обработан с использованием программного обеспечения «Иским-6» (ООО «Институт внедрения новых медицинских технологий «Рамена»; Россия).

Для анализа регуляторных процессов в ССС определяли и рассчитывали показатели ВСР, связанные с парасимпатическими или симпатическими модулирующими влияниями ВНС на синоатриальный (СА) узел. Оценку состояния механизмов регуляции кровообращения осуществляли на основе рекомендаций, разработанных Европейским кардиологическим и Северо-Американским электрофизиологическими обществами [19]. Для оценки биоэлектрических процессов в миокарде использовали дисперсионное картирование ЭКГ (ДК ЭКГ), основанное на анализе микроколебаний, характеризующих электрофизиологические процессы в миокарде [20].

Статистический анализ массива полученных данных проводили с помощью пакета статистических программ STATISTICA 13.0 (IBM; США) с использованием методов кластерного и дисперсионного анализа [21].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для классификации в соответствии с преобладающим типом вегетативной регуляции активности СА узла был применен метод Варда (рис. 3). Проводили интегральный

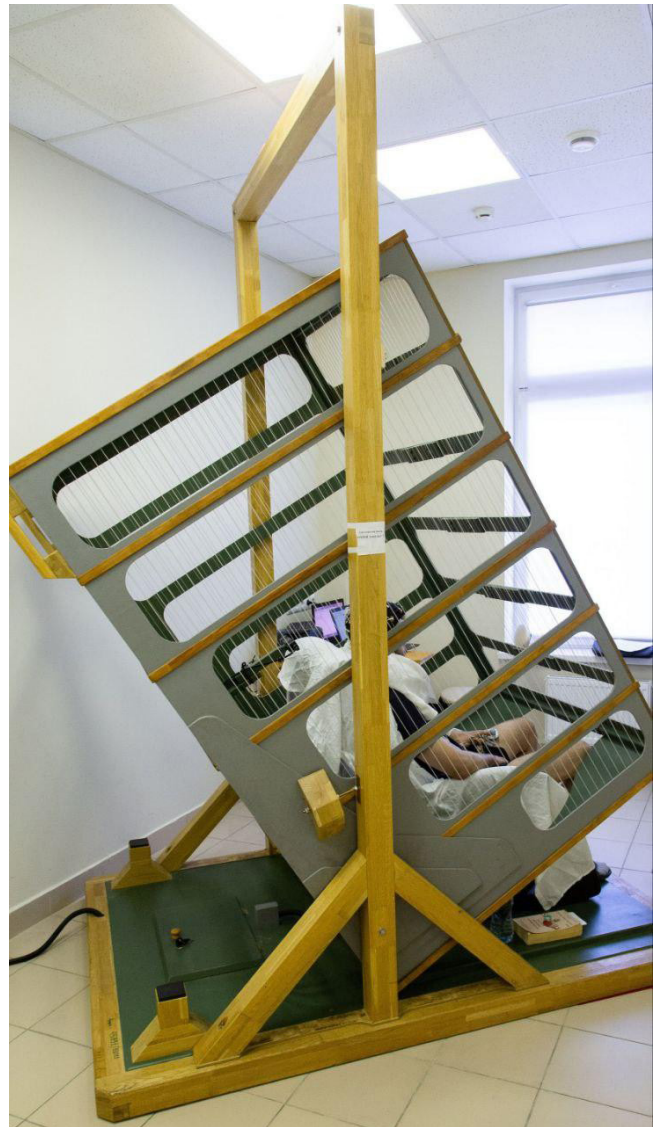


Рис. 1. Система моделирования магнитных полей «Арфа» и проведение исследования

анализ всех зарегистрированных в эксперименте параметров ВСР. В результате были выделены две группы:

- 1) группа 1 — добровольцы, принимавшие участие в эксперименте с преобладанием парасимпатических модулирующих влияний ($n = 4$, добровольцы 1, 2, 4 и 5);
- 2) группа 2 — добровольцы, принимавшие участие в эксперименте с преобладанием симпатических модулирующих влияний ($n = 2$, добровольцы 3, 6).

С помощью кластерного и дискриминантного анализа были определены классификационные функции, в которые вошли наиболее информативные в условиях эксперимента показатели, отражающие баланс вегетативных влияний, в первую очередь, парасимпатическая активность и степень

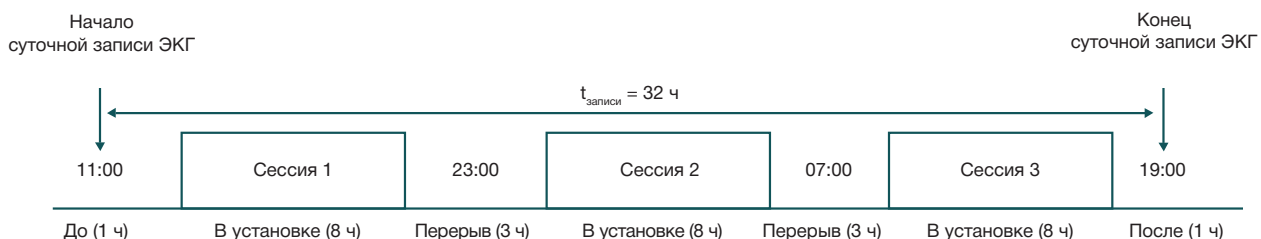


Рис. 2. Циклограмма отдельной серии эксперимента

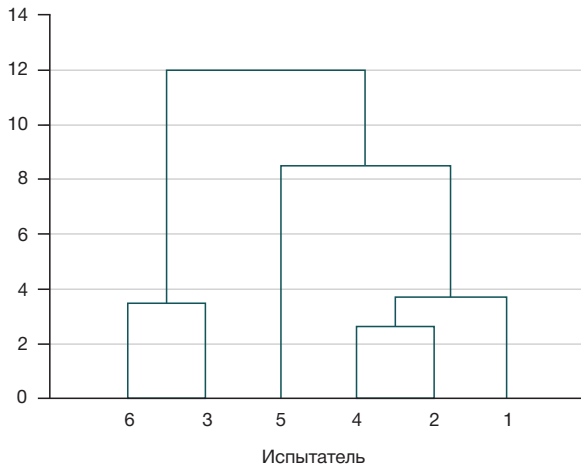


Рис. 3. Деление добровольцев-участников исследования на группы

ее преобладания над симпатическим модулирующими вегетативными влияниями: ЧСС (физиологически отражает системный гомеостаз кровообращения), RMSSD (мс, квадратный корень из суммы разностей последовательного ряда кардиоинтервалов, показатель парасимпатических влияний на ритм сердца), pNN50 (%), число пар кардиоинтервалов с разницей более 50 мс в процентах к общему числу кардиоинтервалов, отражает относительную степень преобладания парасимпатических модулирующих вегетативных влияний в CCC над симпатическими), SDNN (мс, стандартное отклонение полного массива кардиоинтервалов, показатель суммарного эффекта вегетативной регуляции кровообращения), HF

(мс², мощность спектра высокочастотного компонента ВСП от суммарной мощности колебаний, характеризует парасимпатическую активность и степень ее преобладания над симпатической).

Динамика изменения этих показателей на разных этапах эксперимента представлена на рис. 4.

У добровольцев с парасимпатическими модулирующими влияниями параметры RMSSD и HF достоверно снижались по сравнению с серией плацебо во время всех сессий в условиях сниженного МП до 1000 раз, аналогичное снижение было отмечено в условиях до 650 и 350 раз (рис. 4). У добровольцев с симпатическими модулирующими влияниями значения этих показателей повышались после 24-часового пребывания (сессия 3) в условиях сниженного до 650 раз МП. Однако стоит отметить, что в первые восемь часов пребывания в установке при 1000-кратной редукции МП в этой группе было обнаружено достоверное снижение данного показателя по сравнению с плацебо.

Показатели pNN50 и SDNN уменьшились у добровольцев с парасимпатическими влияниями на ритм сердца во 2-й и 3-й сессиях в условиях сниженного поля до 1000 и 650 по сравнению с плацебо, а у пациентов с симпатическими влияниями достоверное снижение значений этих показателей было обнаружено на протяжении всего пребывания в ГМУ, сниженных в 1000, 650 и 350 раз.

Динамика ЧСС (показателя, отражающего стабильность функционирования CCC на системном уровне) в группе добровольцев с парасимпатической модуляцией СА узла увеличивалась на протяжении всего экспериментального воздействия, не выходя за пределы нормальных физиологических значений. В группе с симпатической

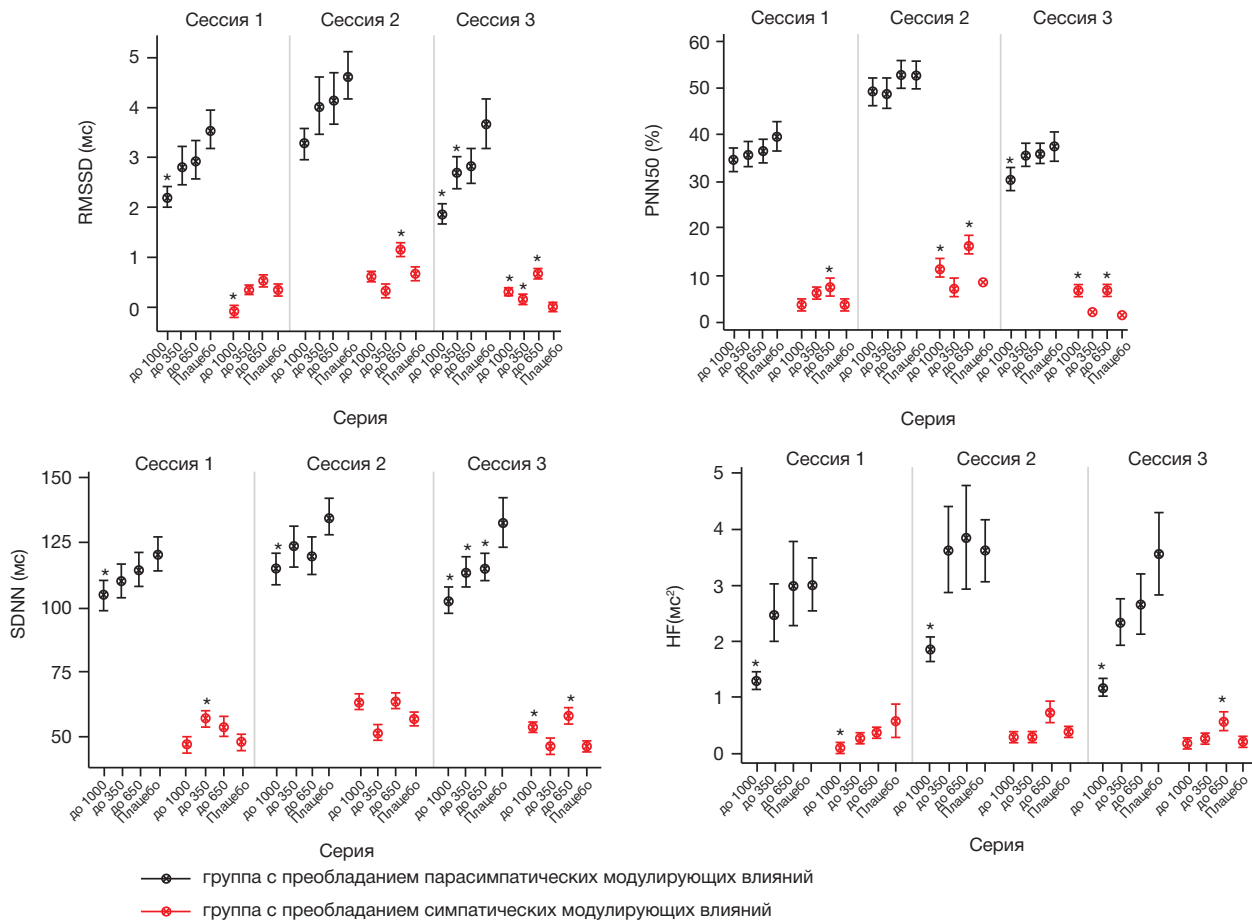


Рис. 4. Наиболее информативные показатели, характеризующие преобладающий тип вегетативной регуляции, и их динамика в ходе эксперимента. * — достоверное различие по сравнению с плацебо

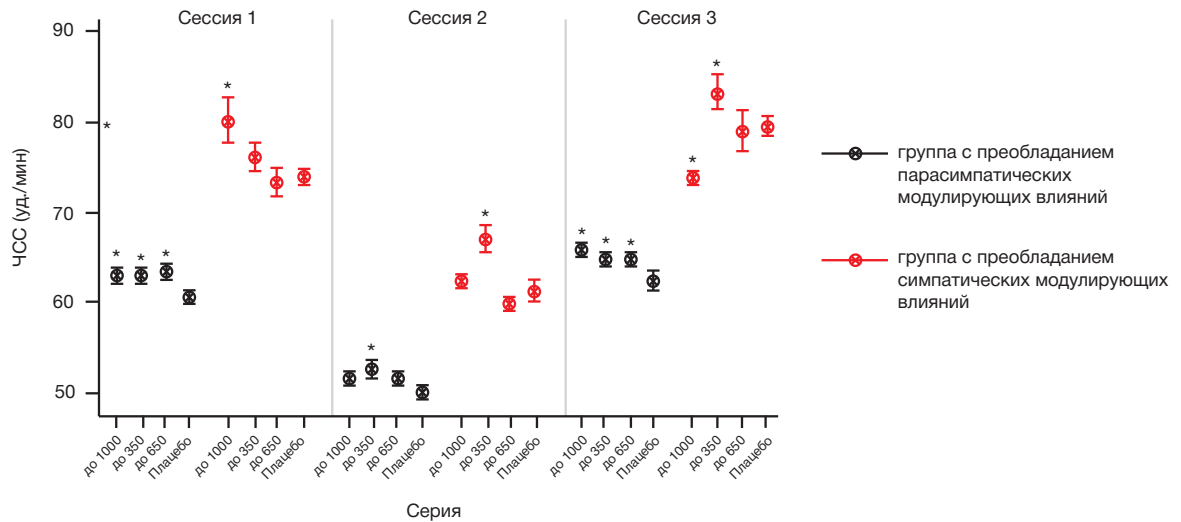


Рис. 5. Динамика показателя ЧСС. * — достоверное различие по сравнению с плацебо

модуляцией было обнаружено достоверное увеличение данного показателя в условиях 1000-кратно и 350-кратно сниженного геомагнитного поля при 8-часовом (сессия 1) и 24-часовом (сессия 3) пребывании соответственно (рис. 5).

При анализе ДК ЭКГ было выявлено, что показатель, отражающий деполаризацию правого желудочка

(G3), достоверно увеличивался на протяжении всей серии 650-кратно сниженного МП у добровольцев с парасимпатическими влияниями (рис. 6). В группе пациентов с симпатическими модуляциями на ритм сердца наблюдали его увеличение в условиях 1000-кратной и 350-кратной редукции МП.

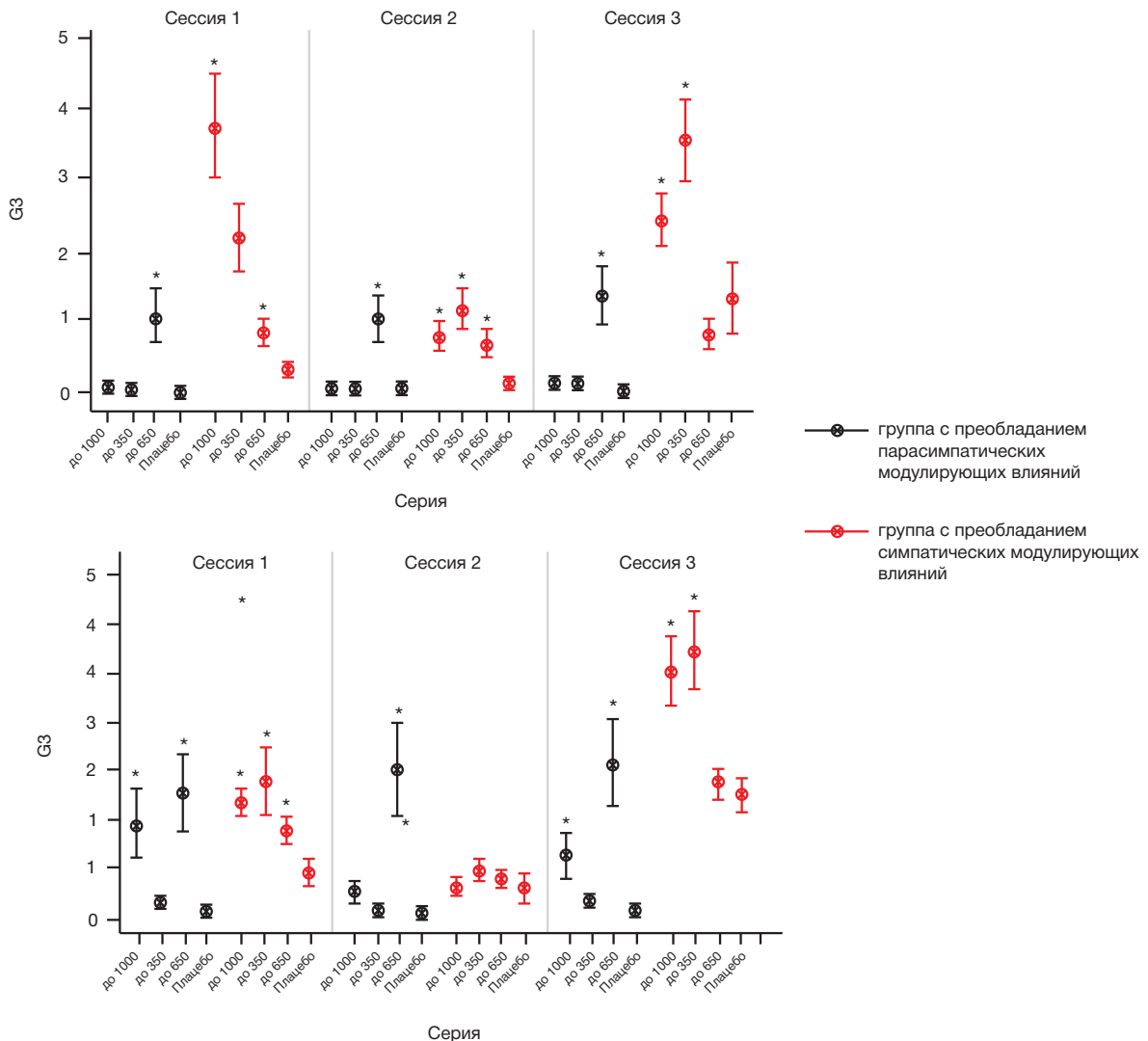


Рис. 6. Динамика показателей ДК ЭКГ. * — достоверное различие по сравнению с плацебо

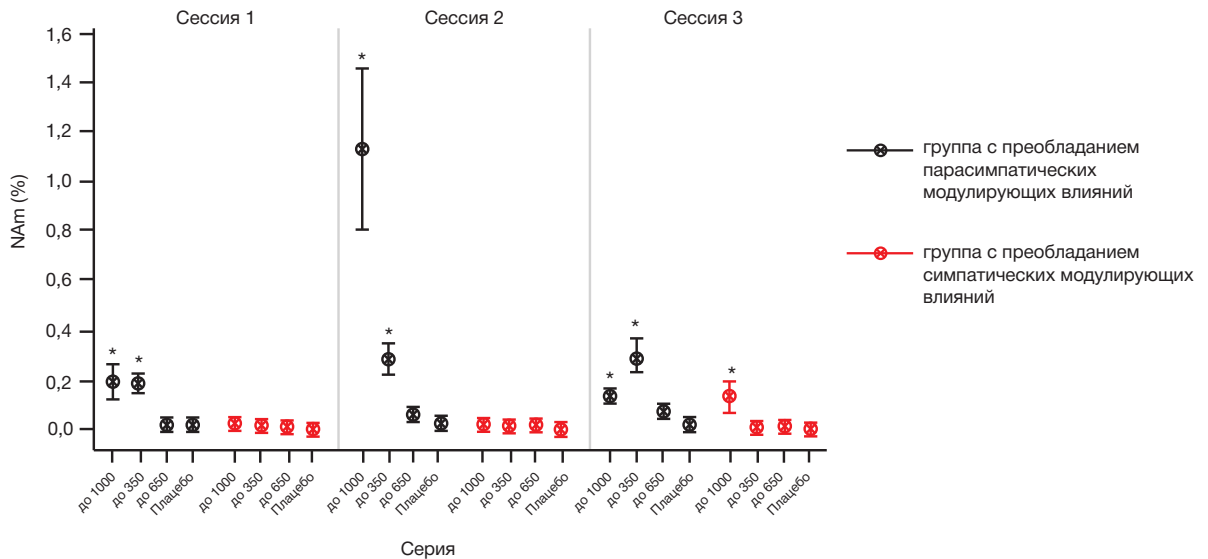


Рис. 7. Динамика NArr. * — достоверное различие по сравнению с плацебо

Показатель G7 (симметрия деполяризации желудочков) у добровольцев с парасимпатическими влияниями достоверно увеличивался в сериях 1000-кратно и 650-кратно сниженного поля, у лиц с симпатическими модуляциями на ритм сердца также наблюдали его увеличение в серию 1000-кратно сниженного МП, однако его значения увеличивались и при 350-кратном снижении МП.

Что касается появления аритмий в ходе эксперимента, то их количество увеличивалось, о чем свидетельствуют значения Narr (%) — количественного показателя, характеризующего общее число аритмий. Его значения повышались в сериях сниженного до 1000 и 350 раз МП у добровольцев с парасимпатическими регуляторными влияниями. В группе пациентов с симпатическими регуляторными влияниями значения Narr увеличивались только к экспериментальной сессии, в которой МП снижалось в 1000 раз (рис. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

VCP характеризует изменение временных интервалов между последовательными сокращениями сердца и служит важным показателем, отражающим динамику активности ВНС и ее влияния на систему кровообращения [22]. Паттерны, наблюдаемые в VCP, показывают функциональное состояние созависимых регуляторных систем, которые работают в разных временных масштабах, чтобы адаптироваться к экологическим и психологическим проблемам. Более низкие степени вариации, скорректированной по возрасту VCP, указывают на хронический стресс, патологию или недостаточное функционирование регуляторных систем в нервной системе и связаны со смертностью от всех причин, в то время как более высокая степень вариации указывает на устойчивость и способность к саморегуляции и адаптации к изменяющимся требованиям [23].

Поскольку у добровольцев с преобладанием парасимпатических влияний поддержание адаптационных процессов происходит за счет нервного контура регуляции, функционального резерва хватает для критических значений (воздействия сниженного МП до 1000 раз). У добровольцев с преобладанием симпатических моделирующих влияний поддержание приспособительных реакций осуществляется метаболическим регуляторным

контуром. В этой группе реакция на воздействие сниженного МП достаточно выражена при пороге его снижения от 350 раз.

Достоверно изменяющиеся параметры ДК ЭКГ G3 и G7 входят в суммарный показатель G3+G4+G7, где G4 — показатель, отражающий деполяризацию левого желудочка, что может говорить о наличии ишемических нарушений: вероятности нарушения кровотока и перфузии миокарда [20].

Показатель, характеризующий количество аритмий, увеличивался у группы с преобладанием парасимпатической регуляции в ночную сессию при сниженном в 1000 раз МП, однако он был в пределах нормы (1–2%). Но при просмотре индивидуальных записей было обнаружено наличие желудочковых экстрасистол (ЖЭ) у одного добровольца, в условиях плацебо их не отмечали.

ЖЭ — наиболее распространенная форма желудочковой аритмии [24]. Было отмечено, что у пациентов без структурных заболеваний сердца ЖЭ может представлять собой так называемую «аритмическую» форму начала развития гипертонической болезни, различных клинических вариантов начала ишемической болезни сердца, миокардита, различных форм кардиомиопатии, инсульта и другой цереброваскулярной патологии, а также быть независимым предиктором формирования жизнеугрожающих желудочковых аритмий, фибрилляции предсердий и внезапной смерти [25].

Известно, что регистрация ЖЭ возрастает при органических заболеваниях сердца, сопровождающихся гипоксемией, поражением миокарда и повышением симпатoadреалового звена ВНС. Было отмечено, что в норме число ЖЭ утром выше, чем в ночное время суток. Было показано, что наличие ЖЭ в ночной период времени может быть связано с преимущественно ночным типом циркадианного распределения у больных синдромом сонного апноэ [26].

Колебания силы ГМП, приводящие к снижению VCP и увеличению ЧСС, могут провоцировать сердечные аритмии [27]. Эта тенденция наиболее выражена в группе гипертоников [28]. Недавно было установлено, что повышенная активность ГМП в низкочастотных диапазонах связана с учащением случаев острой фибрилляции и трепетания предсердий [29]. По-видимому, более высокая интенсивность ГМП в низкочастотных диапазонах

связана с возникновением аритмии, а в высокочастотном диапазоне — с ишемическими кардиальными событиями [30].

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе эксперимента со снижением МП нами были получены уникальные данные о механизмах вегетативной регуляции кровообращения и биоэлектрических процессах в миокарде. Однако важное ограничение исследования — это относительно небольшое

число его участников. Тем не менее один из пилотных экспериментов с влиянием ГМУ на физиологические процессы в организме человека на системном уровне, проведенный нами, имеет определяющее значение для разработки концепции последующих экспериментальных воздействий, связанных с редукцией МП для интересов космической физиологии и медицины. Сложность разработки такой концепции во многом определяется биоэтическими проблемами, связанными с исследованием малоизученных факторов (каким являются ГМУ) на организм человека.

Литература

- Zhang Z, Xue Y, Yang J, Shang P, Yuan X. Biological effects of hypomagnetic field: Ground-based data for space exploration. *Bioelectromagnetics*. 2021; 42 (6): 516–31. DOI: 10.1002/bem.22360.
- Cornéllissen G, Halberg F, Schwartzkopff O, Delmore P, Katinas G, Hunter D, et al. Chronomes, time structures, for chronobioengineering for «a full life». *Biomed Instrum Technol*. 1999; 33: 152–87.
- Kuzmenko NV, Shchegolev BF, Pliss MG, Tsyrlin VA. The Influence of Weak Geomagnetic Disturbances on the Rat Cardiovascular System under Natural and Shielded Geomagnetic Field Conditions *Biophysics*. 2019; 64: 109–16.
- Otsuka K, Cornéllissen G, Norboo T, Takasugi E, Halberg F. Chronomics and «Glocal» (combined Global and Local) assessment of human life. *Prog Theor Phys Suppl*. 2008; 173: 134–52.
- Pishchalnikov RY, Gurfinkel YI, Sarimov RM, Vasin AL, Sasonko ML, Matveeva TA, et al. Cardiovascular response as a marker of environmental stress caused by variations in geomagnetic field and local weather. *Biomed Signal Process Control*. 2019; 51: 401–10.
- Vieira CLZ, Alvares D, Blomberg A, Schwartz J, Coull B, Huang S, et al. Geomagnetic disturbances driven by solar activity enhance total and cardiovascular mortality risk in 263 US cities. *Environ Health*. 2019; 18: 83.
- Otsuka K, Cornéllissen G, Kubo Y, Shibata K, Mizuno K, Ohshima H, et al. Anti-aging effects of long-term space missions, estimated by heart rate variability. *Sci Rep*. 2019; 9: 1–12.
- Ozheredov VA, Chibisov SM, Blagonravov ML, Khodorovich NA, Demurov EA, Goryachev VA, et al. Influence of geomagnetic activity and earth weather changes on heart rate and blood pressure in young and healthy population. *Int J Biometeorol*. 2017; 61: 921–9.
- Gurfinkel YI, Breus TK, Zenchenko TA, Ozheredov VA. Investigation of the effect of ambient temperature and geomagnetic activity on the vascular parameters of healthy volunteers. *Open J Biophys*. 2012; 2: 46–55.
- Zenchenko TA, Skavulyak AN, Khorseva NI, Breus TK. Characteristics of individual reactions of the cardiovascular system of healthy people to changes in meteorological factors in a wide temperature range. *Izvestiya, Atmos Ocean Phys*. 2013; 49: 783–98.
- Breus TK, Baevskii RM, Chernikova AG. Effects of geomagnetic disturbances on humans functional state in space flight. *J Biomed Sci Eng*. 2012; 5: 341–55.
- Vencloviene J, Babarskiene RM, Kiznyns D. A possible association between space weather conditions and the risk of acute coronary syndrome in patients with diabetes and the metabolic syndrome. *Int J Biometeorol*. 2017; 61: 159.
- Katsavriasis C, Preka-Papadema P, Moussas X, Apostolou T, Theodoropoulou A, Papadima T, et al. Helio-geomagnetic influence in cardiological cases. *Adv Space Res*. 2013; 51: 96–106.
- Alabdulgader A, McCraty R, Aktinson M, Vainoras I, Berškieñė K, Mauricienė V, et al. Human heart rhythm sensitivity to earth local magnetic field fluctuations. *JVE International LTD. Journal of Vibroengineering*. 2015; 17 (6): 3271–9.
- Гурфинкель Ю. И., Васин А. Л., Матвеева Т. А., Сасонко М. Л. Оценка влияния гипомангнитных условий на капиллярный кровоток, артериальное давление и частоту сердечных сокращений. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2014; 48 (2): 24–30.
- Демин А. В., Суворов А. В., Орлов О. И. Особенности гемодинамики у здоровых мужчин в гипомангнитных условиях. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2021; 55 (2): 63–8.
- Походзей Л. В. Гипомангнитные условия как неблагоприятный фактор производственной среды [диссертация]. М., 2004.
- Kukanov VYu, Vasin AL, Demin AV, Schastlivtseva DV, Bubeev 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.
- Not author's list. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (Membership of the Task Force listed in the Appendix). *Eur Heart J*. 1996; 93 (5): 1043–65.
- Иванов Г. Г., Сула А. С. Дисперсионное картирование: теоретические основы и клиническая практика. М.: Техносфера, 2009; 192 с.
- Носовский А. М., Попова О. В., Смирнов Ю. И. Современные технологии статистического анализа медицинских данных и способы их графического представления. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2023; 57 (5): 149–54.
- Shaffer F, McCraty R, Zerr CL. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Front Psychol*. 2014; 5: 1040.
- McCraty R, Shaffer F. Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk. *Glob Adv Health Med*. 2015; 4: 46–61.
- Zipes DP, Libby P, Bonow RO, Mann DL, Tomaselli GF. Braunwald's heart disease: a textbook of cardiovascular medicine. 11th ed. Elsevier Science, 2018; p. 2128.
- Олесин А. И., Константинова И. В., Зуева Ю. С., Соколова М. Д. Желудочковая экстрасистолия у пациентов без структурных изменений сердца: механизмы формирования, предикторы развития аритмогенной кардиомиопатии и принципы фармакологической и немедикаментозной терапии. *Международный журнал сердца и сосудистых заболеваний*. 2020; 8 (26): 28–38.
- Лышова О. В., Иванникова Л. В., Моргачев В. Е. Желудочковая экстрасистолия на протяжении сна у мужчин с синдромом z. *Вестник аритмологии*. 2008; 53: 33–40.
- Žiubrytė G, Jaruševičius G, Jurjonaitė J, Landauskas M, McCraty R, Vainoras A. Correlations between acute atrial fibrillation and local earth magnetic field strength. *Journal of Complexity of Health Sciences*. 2018; 2 (1): 31–4.
- Liboff AR. A role for the geomagnetic field in cell regulation. *Electromagn Biol Med*. 2010; 29 (3): 105–12.
- Jaruševičius G, Rugelis T, McCraty R, Landauskas M, Berškieñė K, Vainoras A. Correlation between changes in local Earth's magnetic

field and cases of acute myocardial infarction. *Int J Environ Res Public Health*. 2018; 15 (3): 399.

30. Žiubrytė G, Jaruševičius G, Landauskas M, McCraty R, Vainoras A. The

local earth magnetic field changes impact on weekly hospitalization due to unstable angina pectoris. *Journal of Complexity of Health Sciences*. 2018; 1 (1): 16–25.

References

- Zhang Z, Xue Y, Yang J, Shang P, Yuan X. Biological effects of hypomagnetic field: Ground-based data for space exploration. *Bioelectromagnetics*. 2021; 42(6): 516–31. DOI: 10.1002/bem.22360.
- Cornélissen G, Halberg F, Schwartzkopff O, Delmore P, Katinas G, Hunter D, et al. Chronomes, time structures, for chronobiotechnology for «a full life». *Biomed Instrum Technol*. 1999; 33: 152–87.
- Kuzmenko NV, Shchegolev BF, Pliss MG, Tsyrlin VA. The Influence of Weak Geomagnetic Disturbances on the Rat Cardiovascular System under Natural and Shielded Geomagnetic Field Conditions *Biophysics*. 2019; 64: 109–16.
- Otsuka K, Cornelissen G, Norboo T, Takasugi E, Halberg F. Chronomics and «Glocal» (combined Global and Local) assessment of human life. *Prog Theor Phys Suppl*. 2008; 173: 134–52.
- Pishchalnikov RY, Gurfinkel YI, Sarimov RM, Vasin AL, Sasonko ML, Matveeva TA, et al. Cardiovascular response as a marker of environmental stress caused by variations in geomagnetic field and local weather. *Biomed Signal Process Control*. 2019; 51: 401–10.
- Vieira CLZ, Alvares D, Blomberg A, Schwartz J, Coull B, Huang S, et al. Geomagnetic disturbances driven by solar activity enhance total and cardiovascular mortality risk in 263 US cities. *Environ Health*. 2019; 18: 83.
- Otsuka K, Cornelissen G, Kubo Y, Shibata K, Mizuno K, Ohshima H, et al. Anti-aging effects of long-term space missions, estimated by heart rate variability. *Sci Rep*. 2019; 9: 1–12.
- Ozheredov VA, Chibisov SM, Blagonravov ML, Khodorovich NA, Demurov EA, Goryachev VA, et al. Influence of geomagnetic activity and earth weather changes on heart rate and blood pressure in young and healthy population. *Int J Biometeorol*. 2017; 61: 921–9.
- Gurfinkel YI, Breus TK, Zenchenko TA, Ozheredov VA. Investigation of the effect of ambient temperature and geomagnetic activity on the vascular parameters of healthy volunteers. *Open J Biophys*. 2012; 2: 46–55.
- Zenchenko TA, Skavulyak AN, Khorseva NI, Breus TK. Characteristics of individual reactions of the cardiovascular system of healthy people to changes in meteorological factors in a wide temperature range. *Izvestiya, Atmos Ocean Phys*. 2013; 49: 783–98.
- Breus TK, Baevskii RM, Chernikova AG. Effects of geomagnetic disturbances on humans functional state in space flight. *J Biomed Sci Eng*. 2012; 5: 341–55.
- Vencloviene J, Babarskiene RM, Kiznys D. A possible association between space weather conditions and the risk of acute coronary syndrome in patients with diabetes and the metabolic syndrome. *Int J Biometeorol*. 2017; 61: 159.
- Katsavrias C, Preka-Papadema P, Moussas X, Apostolou T, Theodoropoulou A, Papadima T, et al. Helio-geomagnetic influence in cardiological cases. *Adv Space Res*. 2013; 51: 96–106.
- Alabdulgader A, McCraty R, Atkinson M, Vainoras I, Berškienė K, Mauricienė V, et al. Human heart rhythm sensitivity to earth local magnetic field fluctuations. *JVE International LTD. Journal of Vibroengineering*. 2015; 17 (6): 3271–9.
- Gurfinkel Yul, Vasin AL, Matveeva TA, Sasonko ML. Evaluation of the hypomagnetic environment effects on capillary blood circulation, blood pressure and heart rate. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina*. 2014; 48 (2): 24–30. Russian.
- Demin AV, Suvorov AV, Orlov OI. Osobennosti gemodinamiki u zdorovykh muzhchin v gipomagnitnykh usloviyakh. *Aviakosmicheskaya i jekologicheskaya medicina*. 2021; 55 (2): 63–8. Russian.
- Pokhodzey L. V. *Gipomagnitnye usloviya kak neblagopriyatnyy faktor proizvodstvennoy sredy* [dissertation]. M., 2004. Russian.
- Kukanov VYu, Vasin AL, Demin AV, Schastlivtseva DV, Bubeev 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.
- Not author's list. Heart rate variability. Standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. Task Force of The European Society of Cardiology and The North American Society of Pacing and Electrophysiology (Membership of the Task Force listed in the Appendix). *Eur Heart J*. 1996; 93 (5): 1043–65.
- Ivanov GG, Sula AS. *Dispersionnoe kartirovanie: teoreticheskie osnovy i klinicheskaya praktika*. M.: Tekhnosfera, 2009; p. 192. Russian.
- Nosovsky AM, Popova OV, Smirnov Yul. State-of-the art technologies of medical data statistical analysis and methods of graphic presentation. *Aviakosmicheskaya i Ekologicheskaya Meditsina*. 2023; 57 (5): 149–54. Russian.
- Shaffer F, McCraty R, Zerr CL. A healthy heart is not a metronome: an integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Front Psychol*. 2014; 5: 1040.
- McCraty R, Shaffer F. Heart rate variability: New perspectives on physiological mechanisms, assessment of self-regulatory capacity, and health risk. *Glob Adv Health Med*. 2015; 4: 46–61.
- Zipes DP, Libby P, Bonow RO, Mann DL, Tomaselli GF. *Braunwald's heart disease: a textbook of cardiovascular medicine*. 11th ed. Elsevier Science, 2018; p. 2128.
- Olesin AI, Konstantinova IV, Zueva YuS, Sokolova MD. Ventricular extrasystoles in patients without cardiac structural changes: mechanisms of development, arrhythmogenic cardiomyopathy predictors, pharmacological and non-pharmacological treatment strategies. *International Heart and Vascular Disease Journal*. 2020; 8 (26): 28–38. Russian.
- Lyshova OV, Ivannikova LV, Morgachev VE. Ventricular premature beats during sleep in male patients with syndrome z. *Journal of Arrhythmology*. 2008; 53: 33–40. Russian.
- Žiubrytė G, Jaruševičius G, Jurjonaitė J, Landauskas M, McCraty R, Vainoras A. Correlations between acute atrial fibrillation and local earth magnetic field strength. *Journal of Complexity of Health Sciences*. 2018; 2 (1): 31–4.
- Liboff AR. A role for the geomagnetic field in cell regulation. *Electromagn Biol Med*. 2010; 29 (3): 105–12.
- Jaruševičius G, Rugelis T, McCraty R, Landauskas M, Berškienė K, Vainoras A. Correlation between changes in local Earth's magnetic field and cases of acute myocardial infarction. *Int J Environ Res Public Health*. 2018; 15 (3): 399.
- Žiubrytė G, Jaruševičius G, Landauskas M, McCraty R, Vainoras A. The local earth magnetic field changes impact on weekly hospitalization due to unstable angina pectoris. *Journal of Complexity of Health Sciences*. 2018; 1 (1): 16–25.