

ВЛИЯНИЕ СЛАБЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТУЮ СИСТЕМУ КРЫС В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО И ЭКРАНИРОВАННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

© 2019 г. Н.В. Кузьменко* **, Б.Ф. Щеголев* ***, М.Г. Плисс* **, В.А. Цырлин*

*Национальный медицинский исследовательский центр имени В.А. Алмазова МЗ РФ,
197341, Санкт-Петербург, ул. Аккуратова, 2

**Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И.П. Павлова,
197022, Санкт-Петербург, ул. Льва Толстого, 6/8

***Институт физиологии им. И.П. Павлова РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 6
E-mail: kuzmenko@niiekf.ru

Поступила в редакцию 23.04.18 г.

После доработки 26.10.18 г.

Принята к публикации 19.11.18 г.

В условиях естественного и экранированного геомагнитного поля исследовано влияние слабых геомагнитных возмущений на систолическое артериальное давление, межсистоличный интервал, а также на низкочастотный и высокочастотный компоненты спектра variability сердечного ритма и соотношение этих компонентов. Исследования проводили на самцах крыс линии Wistar, помещенных в имитационную и экранирующую камеры. В имитационной камере в дни геомагнитных возмущений происходили значительные сдвиги исследуемых параметров: увеличение систолического артериального давления, а также низкочастотного и высокочастотного компонентов спектра variability сердечного ритма. В экранирующей камере параметры при спокойном и возмущенном геомагнитном поле существенно не различались. Кроме того, в имитационной камере величина среднесуточного атмосферного давления обратно коррелировала с систолическим артериальным давлением, в условиях экранированного геомагнитного поля данная взаимосвязь существенно ослаблялась. Сделан вывод о том, что слабые геомагнитные возмущения оказывают влияние на функционирование сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем. Высказано предположение о том, что усиление эффекта действия незначительного понижения атмосферного давления на систолическое артериальное давление в естественном геомагнитном поле может быть связано с воздействием геомагнитной активности на механизмы оксигенации крови.

Ключевые слова: индекс геомагнитной активности, магнитное поле, экранирование, артериальное давление, межсистоличный интервал, variability сердечного ритма.

DOI: 10.1134/S0006302919010162

Величина индукции магнитного поля Земли составляет около 35000–50000 нТл на средних широтах, увеличиваясь вблизи полюсов до 65000 нТл. Известно, что нестационарные процессы на Солнце (выбросы корональной массы и корональные дыры) вызывают геомагнитные бури [1]. Возмущения геомагнитного поля во время сильных магнитных бурь достигают 300 нТл, что составляет менее 1% от величины

индукции естественного магнитного поля Земли [2]. Тем не менее проблема воздействия геомагнитных возмущений на здоровье человека давно и широко изучается. По результатам ряда работ наиболее значительное влияние геомагнитных возмущений оказывают на функционирование сердечно-сосудистой и нервной систем [3–8].

Следует отметить, что помимо флуктуаций геомагнитного поля на жителей Земли каждый день действуют и метеорологические факторы (атмосферное давление, температура и влажность воздуха, направление и скорость ветра), чье влияние не менее существенно [9–11]. Обыч-

Сокращения: САД – систолическое артериальное давление, МСИ – межсистоличный интервал, НЧ – низкочастотный компонент спектра variability сердечного ритма, ВЧ – высокочастотный компонент спектра variability сердечного ритма.

но достаточно трудно понять, каким именно из факторов вызваны наблюдаемые изменения состояния организма. Известно, что метеорологические факторы могут как усиливать, так и ослаблять действия друг друга. В то же время состояние геомагнитного поля может изменяться в течение суток от спокойного до геомагнитной бури, а это значит, что на результаты исследований может оказать влияние и момент регистрации параметров. Для характеристики состояния геомагнитного поля принято использовать два планетарных индекса геомагнитной активности – K_p и A_p , измеряемые в единицах напряженности магнитного поля в нТл [12,13]. K_p (планетарный индекс) вычисляется для трехчасового интервала времени как среднее значение К-индексов, определенных на 13 геомагнитных обсерваториях, расположенных между 44-м и 60-м градусами северной и южной геомагнитных широт. A_p – ежедневный индекс геомагнитной активности, полученной как среднее число из восьми трехчасовых значений.

Эксперименты, поставленные нами в стандартных лабораторных условиях (с поддержанием постоянных значений температуры и влажности) в специальной камере, ослабляющей магнитное поле Земли и экранирующей различные переменные магнитные поля, исключают воздействие всех метеорологических факторов, кроме атмосферного давления. Таким образом, исследование взаимосвязи между геомагнитной активностью и параметрами гемодинамики в условиях экранирования и в условиях естественного геомагнитного поля позволит ответить на вопрос, оказывают ли небольшие возмущения геомагнитного поля влияние на функционирование сердечно-сосудистой системы. Кроме того, в этих условиях появляется возможность проанализировать совместное действие геомагнитной активности и атмосферного давления на сердечно-сосудистую и вегетативную нервную системы. Этим исследованиям и посвящена настоящая статья.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Общие условия проведения эксперимента. Исследования проводили в июне–июле 2012 г. в виварии Северо-западного федерального медицинского исследовательского центра имени В.А. Алмазова, Санкт-Петербург, географические координаты 59°56' с.ш., 30°18' в.д. Условия проведения исследований были согласованы с Этическим комитетом Центра, было получено разрешение на их проведение (№ 77 от 21.06.2010 г.). Эксперименты были поставлены на 16 конвенциональных крысах-самцах линии

Wistar возрастом три месяца и массой 250–300 г. Все крысы, задействованные в данном исследовании, принадлежали к одной популяции животных вивария СЗФМИЦ им. В.А. Алмазова, выведенной из одного племенного ядра.

Для проведения экспериментов были изготовлены две камеры (экранирующая и имитационная) в виде цилиндров диаметром 60 см и длиной 140 см, закрытые с одного торца и открытые с другого так, чтобы в глубину камеры легко помещались клетки с крысами. Поверхность экранирующей камеры была покрыта несколькими слоями аморфного магнитомягкого материала АМАГ-172, что обеспечивало 40-кратное уменьшение величины индукции магнитного поля Земли внутри камеры (с 48000 нТл до 1200 нТл), а также эффективное экранирование от различных переменных магнитных полей. Замеры величины индукции магнитного поля Земли снаружи и внутри камеры проводили отечественным трехкомпонентным магнитометром НВ0302.1А (100–100000 нТл). Имитационная камера была изготовлена из картона и покрыта полиэтиленом. Все камеры были расположены так, чтобы возможные источники магнитного загрязнения (электротранспорт, трансформаторы, машины и механизмы и т.д.) располагались на достаточном удалении.

В имитационную и экранирующую камеру помещали по восемь крыс в каждую. Обе камеры находились в одинаковых стандартных лабораторных условиях, крысы имели свободный доступ к пище и воде.

У животных регистрировали исходные значения параметров гемодинамики и компонентов спектра variability сердечного ритма, и затем после помещения крыс в камеры в течение трех недель проходила регистрация исследуемых показателей. В период с 28.06.2012 г. по 17.07.2012 г. крысы постоянно находились в камерах. Регистрацию параметров проводили в группах в одни и те же дни (рис. 1) и в одно и то же время суток (10.00–15.00). Во время регистрации исследуемых параметров условия эксперимента сохранялись: крыс помещали либо в малую экранирующую камеру, либо в малую имитационную камеру.

Измерение параметров гемодинамики. Измерение параметров гемодинамики производили у бодрствующих интактных животных, зафиксированных в рестрейнере, с использованием компьютерной программы Chart на системе неинвазивного измерения кровяного давления (ADInstruments, Австралия), включающей контроллер ML125 NIBP, датчик пульса MLT125R и хвостовую манжетку для крыс. Частота опроса – 100 Гц, FFT – 1024. Данная система

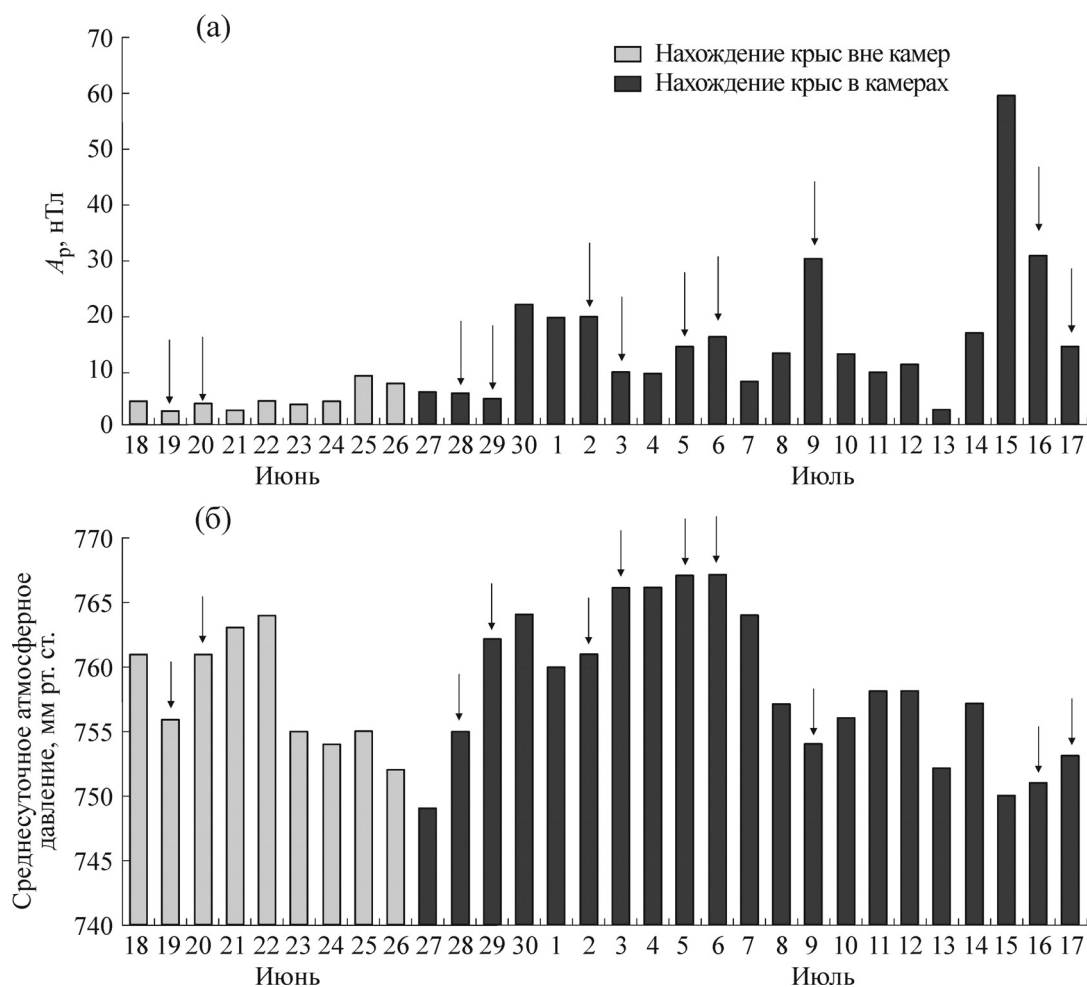


Рис. 1. Величина A_p -индекса геомагнитной активности (а) и среднесуточного атмосферного давления (б) в период проведения эксперимента (июнь–июль 2012 г.). Черные стрелки – дни регистрации параметров.

позволяет регистрировать систолическое артериальное давление (САД) и межсистольный интервал (МСИ). На каждом животном в день регистрации проводили пять–шесть измерений исследуемых параметров, затем вычисляли их среднее значение.

Одновременно с регистрацией параметров гемодинамики с помощью программы Chart крысам проводили спектральный анализ вариабельности сердечного ритма. Для анализа брали короткие участки записи пульсаций, три–пять пульсограмм продолжительностью 40 с. С помощью математических методов, принятых Североамериканским Обществом электростимуляции и электрофизиологии, проводили расчет в $\text{мс}^2/\text{Гц}$ низкочастотной (НЧ) части спектра (0,15–0,8 Гц), используемой как маркер активности симпатической нервной системы, и высокочастотной (ВЧ) части спектра (0,8–2,5 Гц), характеризующей парасимпатическую активность [14]. По соотношению НЧ/ВЧ делали

вывод о симпато-вагусном балансе в регуляции работы сердца.

Исследование влияния атмосферного давления и геомагнитной активности на функционирование сердечно-сосудистой системы. Для исследования влияния геомагнитной активности на параметры гемодинамики и вариабельность сердечного ритма с сайта Space weather prediction center (ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/indices/old_indices/) были взяты значения планетарных K_p - и A_p -индексов за период проведения эксперимента. Исследовали корреляцию K_p - и A_p -индексов с параметрами гемодинамики и компонентами спектра вариабельности сердечного ритма в естественных геомагнитных условиях и в условиях экранирования. Также было проведено сравнение исследуемых параметров в дни со спокойным геомагнитным полем (28.06.2012 г. и 29.06.2012 г.) и возмущенном геомагнитным полем (09.07.2012 г.). Выбирали наиболее близкие даты с учетом максимальной

Таблица 1. Исходные параметры гемодинамики и компоненты спектра variability сердечного ритма

Параметры	Имитационная камера, $n = 8$	Экранирующая камера, $n = 8$	p
САД, мм рт.ст.	111,5 (100,2; 115,0)	106,4 (103,9; 109,7)	0,990
МСИ, мс	161,5 (149,0; 167,0)	149,4 (144,3; 171,7)	0,645
НЧ, мс ² /Гц	18,2 (15,0; 25,7)	23,1 (14,5; 34,0)	0,959
ВЧ, мс ² /Гц	101,3 (91,1; 135,6)	103,3 (89,2; 124,2)	0,878
НЧ/ВЧ	0,18 (0,16; 0,21)	0,22 (0,13; 0,31)	0,645

Примечание. p – Значимость различий между группами (U -критерий Манна–Уитни), n – количество животных в группе. Результаты представлены в виде «медиана (25-й и 75-й перцентили)».

Таблица 2. Влияние геомагнитной активности и атмосферного давления на параметры гемодинамики и компоненты спектра variability сердечного ритма

Параметры	K_p -индекс, нТл		A_p -индекс, нТл		Атмосферное давление, мм рт. ст.	
	Имитационная камера, $n = 40$	Экранирующая камера, $n = 40$	Имитационная камера, $n = 40$	Экранирующая камера, $n = 40$	Имитационная камера, $n = 40$	Экранирующая камера, $n = 40$
САД, мм рт.ст.	0,248*	0,127	0,387**	0,202	-0,332**	-0,181
МСИ, мс	0,120	0,002	0,166	0,008	-0,027	0,058
НЧ, мс ² /Гц	0,402**	0,202	0,374**	0,165	-0,125	-0,001
ВЧ, мс ² /Гц	0,366**	0,051	0,314**	-0,062	-0,045	0,182
НЧ/ВЧ	0,213	0,213	0,204	0,201	-0,199	-0,054

Примечание. * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$ – значимость корреляции, n – количество регистраций. Результаты представлены в виде коэффициента корреляции Кендалла.

разницы по A_p -индексу и минимальной разницы по величине атмосферного давления.

Для исследования влияния величины среднесуточного атмосферного давления на исследуемые параметры были взяты данные об атмосферном давлении в дни регистрации параметров с сайта <https://www.gismeteo.ru/diary/>. В естественных геомагнитных условиях и в условиях экранирования геомагнитного поля была исследована корреляция среднесуточной величины атмосферного давления с параметрами гемодинамики и компонентами спектра variability сердечного ритма.

Статистическая обработка данных. Статистическую обработку данных проводили с помощью программы Statistica 6.0. Поскольку группы включали небольшое количество животных, были применены методы непараметрической статистики. Две независимые группы сравнивали с помощью U -критерия Манна–Уитни, две зависимые группы – с помощью T -критерия Вилкоксона. Результаты представлены в виде медианы и интерквартильного размаха (25-й и 75-й перцентили). Статистически значимыми считались различия данных при $p < 0,05$. Взаимосвязь между исследуемыми параметрами функционирования сердечно-сосуди-

стой системы и метеорологическими факторами устанавливали при помощи критерия ранговой корреляции Кендалла. Корреляцию считали статистически значимой при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В нашем эксперименте крысы, находящиеся в имитационной камере, и крысы, размещенные в экранирующей камере, существенно не различались по исходной величине САД, длине МСИ, плотности компонентов спектра variability сердечного ритма и симпато-вагусному балансу (табл. 1).

В период, когда мы проводили регистрацию параметров гемодинамики, K_p -индекс геомагнитной активности изменялся от 1 до 5 нТл, а A_p -индекс – от 5 до 31 нТл (рис. 1). У крыс, находящихся в естественных геомагнитных условиях, была выявлена прямая взаимосвязь между САД и величиной K_p - и A_p -индексов (табл. 2, рис. 2). Также у крыс этой группы НЧ- и ВЧ-компоненты спектра variability сердечного ритма прямо коррелировали с K_p - и A_p -индексами (табл. 2; рис. 3, 4). Все обнаруженные корреляции параметров с индексами геомагнитной активности были слабыми, но

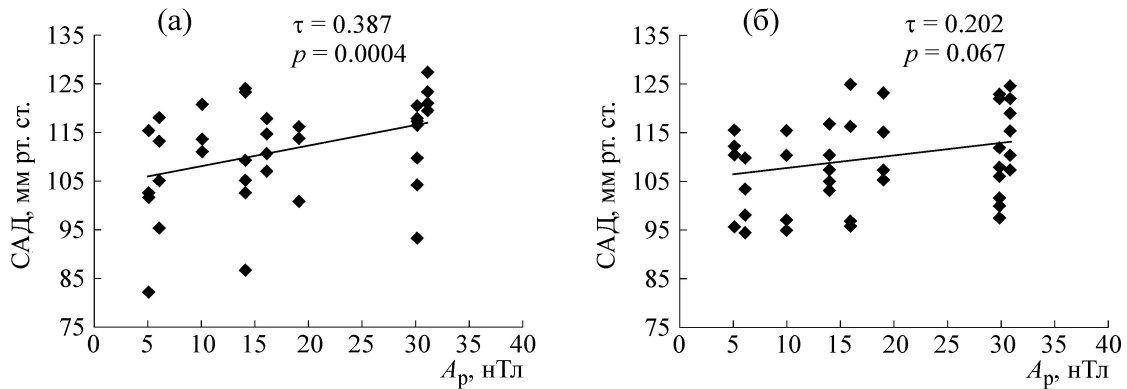


Рис. 2. Влияние геомагнитной активности на систолическое артериальное давление в условиях естественного (а) и экранированного (б) геомагнитного поля. τ – Коэффициент корреляции Кендалла, p – значимость корреляции.

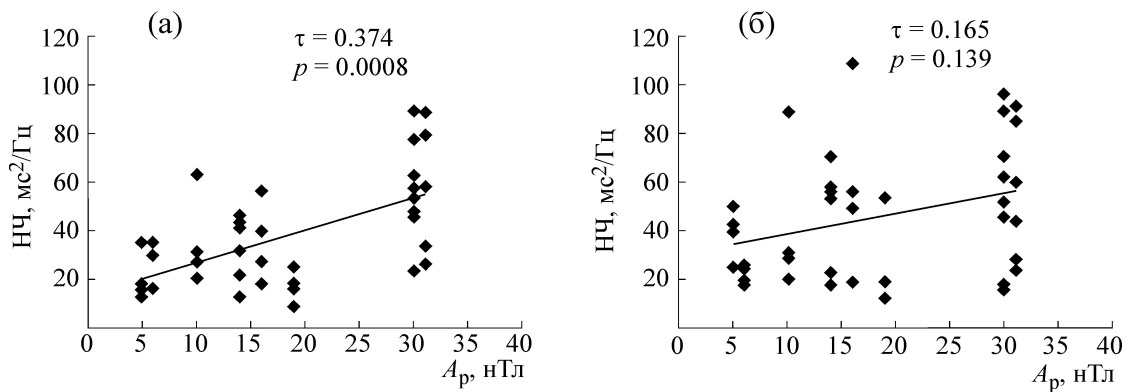


Рис. 3. Влияние геомагнитной активности на низкочастотный компонент variability сердечного ритма в условиях естественного (а) и экранированного (б) геомагнитного поля. τ – Коэффициент корреляции Кендалла, p – значимость корреляции.

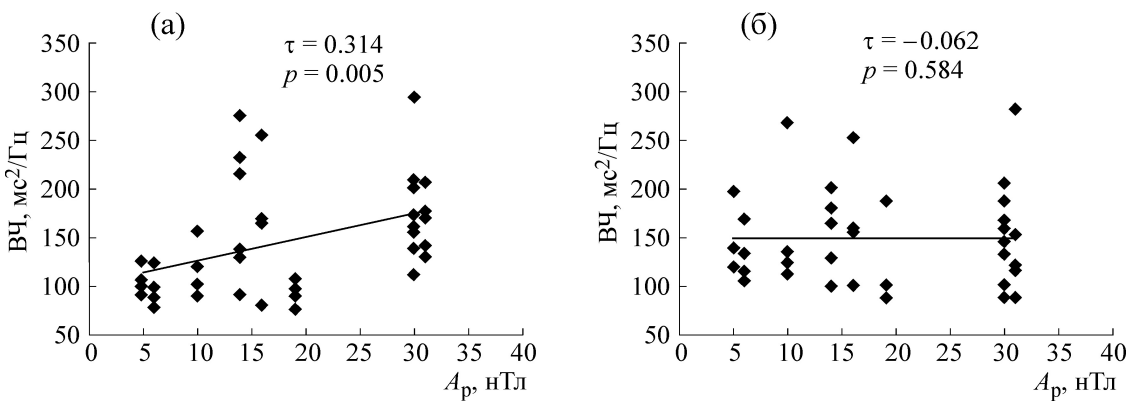


Рис. 4. Влияние геомагнитной активности на высокочастотный компонент variability сердечного ритма в условиях естественного (а) и экранированного (б) геомагнитного поля. τ – Коэффициент корреляции Кендалла, p – значимость корреляции.

статистически значимыми. У крыс, помещенных в экранирующую камеру, не отмечали значимой корреляции параметров гемодинамики и компонентов спектра variability сердечного ритма с индексами геомагнитной активности

(табл. 2; рис. 2–4). Сравнение данных регистрации параметров в дни со спокойным и возмущенным геомагнитным полем показали (табл. 3), что в имитационной камере при слабо возмущенном геомагнитном поле ($A_p = 30$ нТл)

Таблица 3. Параметры гемодинамики и компоненты спектра variability сердечного ритма в условиях спокойного и возмущенного геомагнитного поля

Параметры	Имитационная камера $n = 8$			Экранирующая камера $n = 8$		
	A_p 5–6 нТл	A_p 30 нТл	p	A_p 5–6 нТл	A_p 30 нТл	p
Дата регистрации	28.06.2012 29.06.2012	09.07.2012		28.06.2012 29.06.2012	09.07.2012	
САД, мм рт. ст.	103 (99; 109)	117* (113; 118)	0,018	107 (98; 111)	107 (101; 115)	0,401
МСИ, мс	162 (156; 170)	171 (167; 188)	0,093	176 (174; 182)	174 (169; 197)	0,674
НЧ, мс ² /Гц	17 (16; 31)	55* (47; 66)	0,012	26 (23; 41)	57 (39; 75)	0,050
ВЧ, мс ² /Гц	99 (91; 111)	167* (152; 204)	0,012	137 (118; 147)	152 (125; 173)	0,327
НЧ/ВЧ	0,20 (0,18; 0,28)	0,34 (0,28; 0,41)	0,093	0,21 (0,18; 0,24)	0,35 (0,26; 0,40)	0,050

Примечание. * $p < 0,05$ – значимость различий при A_p 30 нТл от A_p 5–6 нТл (T -критерий Вилкоксона), n – количество животных в группе. Результаты представлены в виде «медиана (25-й и 75-й перцентили)».

наблюдались подъем уровня САД, тенденция увеличения длины МСИ, а также существенное увеличение НЧ- и ВЧ-компонентов спектра variability сердечного ритма. В экранирующей камере исследуемые показатели в периоды спокойного и возмущенного геомагнитного поля существенно не различались, за исключением тенденции увеличения НЧ-компонента спектра variability сердечного ритма в дни с геомагнитными возмущениями (табл. 3). Из результатов наших экспериментов можно сделать вывод о том, что даже небольшие возмущения геомагнитного поля оказывают влияние на функционирование сердечно-сосудистой и вегетативной нервной системы. Увеличение общей мощности спектра variability сердечного ритма в период слабых геомагнитных возмущений может быть связано с активацией адаптационных механизмов организма, например барорефлекторных. Однако при наблюдении эффектов сильного и продолжительного геомагнитного возмущения (в период 26–29.09.2011 г.) на параметры гемодинамики мы зафиксировали тенденцию увеличения уровня САД и уменьшение компонентов спектра variability сердечного ритма [15]. Это можно объяснить тем, что вегетативные механизмы регуляции САД, такие как барорецепторный рефлекс, являются механизмами кратковременного действия [16].

В ряде клинических исследований было обнаружено влияние геомагнитных возмущений на сердечно-сосудистую и вегетативную нервную системы [3–7]. Установлено, что геомагнитные бури могут вызывать тахикардию и повышение артериального давления [2,6,9]. Мониторинг сердечно-сосудистой функции космонавтов на станции «Мир» показал, что во время геомагнитных бурь наблюдается уменьшение variability сердечного ритма [1]. Исследо-

вания, проведенные японскими учеными в субарктических областях, продемонстрировали увеличение частоты сердечных сокращений и уменьшение variability сердечного ритма у людей при возмущениях геомагнитного поля [3]. В литературе сообщается об угнетающем действии геомагнитного шторма на величину барорецепторного рефлекса [5]. В противоположность этому, авторы работы [7] наблюдали уменьшение компонентов спектра variability сердечного ритма в дни, предшествующие и последующие геомагнитной буре, а не в момент самой бури. Мониторинг параметров гемодинамики членов экипажа космического корабля «Союз» показал, что если при магнитной бури ВЧ-компонент спектра variability сердечного ритма не изменялся или уменьшался, то НЧ-компонент имел тенденцию к увеличению [17].

В дни, когда мы регистрировали параметры гемодинамики, величина среднесуточного атмосферного давления колебалась от 751 до 767 мм рт. ст. (рис. 1). У крыс, находящихся в естественных геомагнитных условиях, была выявлена слабая обратная корреляция САД со среднесуточной величиной атмосферного давления (табл. 2, рис. 5). У крыс, размещенных в экранирующей камере, взаимосвязь не была значимой (табл. 2, рис. 5). Факт усиления эффекта колебаний атмосферного давления на САД в естественном геомагнитном поле заслуживает отдельного внимания, поскольку может помочь приблизиться к пониманию механизмов воздействия флуктуаций геомагнитного поля на организм.

Механизм действия атмосферного давления на организм связан с его влиянием на насыщение организма кислородом. Известно, что весовое содержание кислорода в воздухе прямо пропорционально атмосферному давлению за

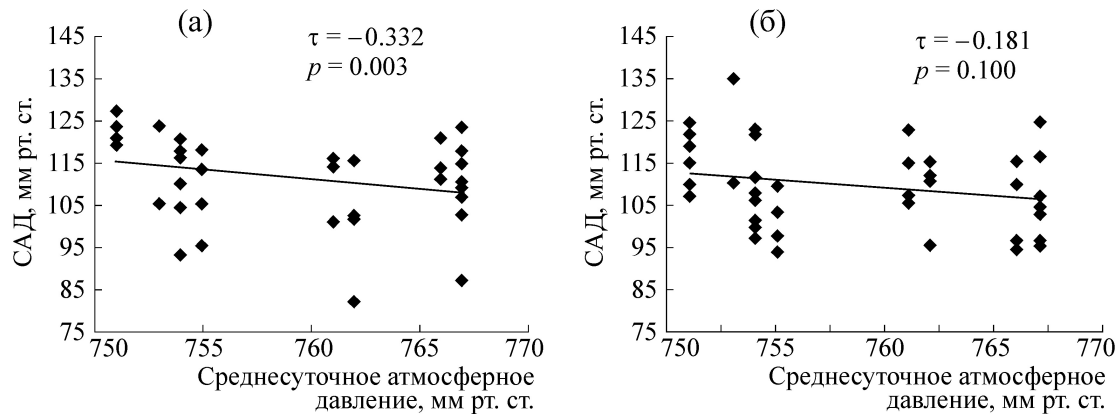


Рис. 5. Влияние величины среднесуточного атмосферного давления на систолическое артериальное давление в условиях естественного (а) и экранированного (б) геомагнитного поля. τ – Коэффициент корреляции Кендалла, p – значимость корреляции.

вычетом парциального давления водяного пара и обратно пропорционально температуре воздуха [18]:

$$\rho_{O_2} = \frac{10^3 \cdot 0,232(P - e)}{RT}, \quad (1)$$

где 0,232 – массовая доля кислорода в воздухе, P – атмосферное давление в Па, e – парциальное давление водяного пара в Па, R – удельная газовая постоянная сухого воздуха 287 Дж/(кг·К), T – температура воздуха в К.

С помощью пульсовой оксиметрии была показана прямая корреляция между среднесуточным значением атмосферного давления и кислородной сатурацией гемоглобина [19]. Поскольку, по нашим данным, геомагнитное поле усиливает эффект незначительного понижения атмосферного давления на САД, можно предположить, что геомагнитная активность также оказывает влияние на процессы оксигенации крови. Во-первых, это может быть связано с изменениями микроциркуляции и нарушением транскапиллярного обмена, зарегистрированному некоторыми исследователями в период геомагнитных возмущений [20–23]. Во-вторых, этому могут способствовать дезоксигемоглобин и кислород, парамагнитные свойства которых хорошо известны [24,25]. В исследованиях *in vitro* было показано увеличение скорости деоксигенации гемоглобина под воздействием магнитного поля [26]. Кроме того, установлено влияние оксигенации-деоксигенации на агрегацию эритроцитов [27]. В исследованиях эффектов воздействия меняющегося магнитного поля Земли на гематологические параметры также было зафиксировано изменение агрегации эритроцитов в дни геомагнитных возмущений [28,29]. С одной стороны, колебания оксигенации крови под воздействием флуктуаций гео-

магнитной активности через хеморецепторы сосудистого русла и продолговатого мозга стимулируют сдвиги параметров гемодинамики и активностей отделов вегетативной нервной системы. С другой стороны, колебания артериального давления, оказывая влияние на скорость движения крови по капиллярам, изменяют кислородный обмен между кровью и тканями.

Механизм воздействия геомагнитных бурь на организм млекопитающих до сих пор непонятен. К настоящему времени выдвинуты несколько гипотез, пытающихся объяснить эффект геомагнитных возмущений: гипотеза биологически эффективных экстремально низких частот электромагнитных полей, гипотеза изменения нормального гомеостаза ионов в организме при воздействии геомагнитного возмущения, гипотеза воздействия магнитных полей через свободные радикалы и др. [2]. На сегодняшний день в магнитобиологии преобладает концепция о том, что основной вклад в магнитозависимость биосистем вносят процессы с участием радикалов, ион-радикалов, парамагнитных частиц. Неспаренные электроны в них являются носителями спинового магнетизма, именно они взаимодействуют с магнитными полями [30]. По нашему мнению, процессы оксигенации-деоксигенации с участием парамагнитных молекул дезоксигемоглобина и кислорода хорошо вписываются в эту концепцию.

Наша гипотеза о воздействии геомагнитной активности на процессы оксигенации позволяет объяснить противоречивость результатов, полученных разными авторами при исследовании влияния геомагнитных возмущений на организм, поскольку помимо геомагнитной активности на оксигенацию крови оказывают влияние и другие метеорологические факторы – атмосферное давление, температура и влажность

воздуха. Кроме того, на насыщенность крови кислородом воздействуют и различные патологические процессы внутри самого организма (заболевания крови, патология сердечно-сосудистой, эндокринной, дыхательной систем и др.) [31–35], которые могут повысить метеочувствительность индивидуума. Действительно, в клинических исследованиях показана прямая взаимосвязь между геомагнитными бурями и обострениями ишемической болезни сердца [36–39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Геомагнитные возмущения слабой силы оказывают влияние на функционирование сердечно-сосудистой и вегетативной нервной систем. Установлено, что при геомагнитных возмущениях происходит рост уровня артериального давления и изменение компонентов спектра variability сердечного ритма.

2. Геомагнитное поле усиливает действие незначительного понижения атмосферного давления на систолическое артериальное давление.

3. Обращено внимание на возможное воздействие геомагнитных возмущений на процессы оксигенации крови.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2014–2020 гг. (ГП-14, раздел 63).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Н. Г. Птицина, Д. Виллорези, Л. И. Дорман и др., *Успехи физ. наук* **168** (7), 767 (1998).
- S. J. Palmer, M. J. Rycroft, and M. Cernack, *Surv. Geophys.* **27** (5), 557 (2006).
- K. Otsuka, G. Cornélissen, A. Weydahl, et al., *Biomed. Pharmacother.* **55** (1), 51s (2001).
- J. Vencloviene, R. Babarskiene, I. Milvidaite, et al., *Int. J. Biometeorol.* **58** (6), 295 (2014).
- J. Gmitrov and C. Ohkubo, *Bioelectromagnetics.* **23** (5), 329 (2002).
- E. Stoupel, *Biomed. Pharmacother.* **56** (2), 247s (2002).
- R. McCraty, M. Atkinson, V. Stolc, et al., *Int. J. Environ. Res. Public Health* **14** (7), E770 (2017).
- S. Dimitrova, I. Stoilova, and I. Cholakov, *Bioelectromagnetics* **25** (6), 408 (2004).
- M. Jehn, L. J. Appel, and F. M. Sacks, *Am. J. Hypertens.* **15** (11), 941 (2002).
- Р. М. Заславская, З. А. Щербань и С. И. Логвиненко, *Научные ведомости БелГУ. Серия: Медицина. Фармация* **4** (99), 104 (2011).
- Н. В. Пизова, С. Д. Прозоровская и А. В. Пизов, *Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика* **1**, 63 (2012).
- J. Bartels, *Potsdamer erdmagnetische Kennziffern*, 1 Mitteilung. *Zeitschrift für Geophysik.* **14**, 68 (1938).
- Н. А. Заболотная, *Индексы геомагнитной активности* (Изд-во ЛКИ, 2007).
- American Heart Association, *Circulation* **93**, 1043 (1996).
- Н. В. Кузьменко, М. Г. Плисс, Н. С. Рубанова и др., *Трансляционная медицина* **4** (1), 34 (2017).
- I. M. Salman, *Curr Hypertens. Rep.* **18** (3), 18 (2016).
- T. K. Breus, R. M. Baevskii, and A. G. Chernikova, *J. Biomed. Sci. Engineer.* **5**, 341 (2012).
- В. Ф. Овчарова, *Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физкультуры* **2**, 29 (1981).
- C. A. Pope, D. W. Dockery, R. E. Kanner, et al., *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* **159**, 365 (1999).
- T. A. Zenchenko, A. G. Rekhtina, L. V. Poskotinova, et al., *Bull. Exp. Biol. Med.* **152** (4), 402 (2012).
- J. Gmitrov, *Electromagn. Biol. Med.* **24** (1), 31 (2005).
- Н. В. Помыткина и Е. Л. Сорокин, *Практическая медицина* **4** (59), 136 (2012).
- Ю. И. Гурфинкель, Н. В. Каце, О. В. Макеева и В. М. Михайлов, в сб. *Методы нелинейного анализа в кардиологии и онкологии* (М.: Университет, 2010), сс. 111–121.
- L. Pauling and Ch. Coruell, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **22**, 210 (1936).
- D. R. Shanklin, *Exp. Mol. Pathol.* **93** (3), 365 (2012).
- D. Muehsam, P. Lalezari, R. Lekhraj, et al., *PLoS One* **8** (4), e61752 (2013).
- I. Cicha, Y. Suzuki, N. Tateishi, et al., *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* **284** (6), 2335 (2003).
- Ю. Я. Варакин, В. Г. Ионова, Е. А. Сазанова и др., *Экология человека* **7**, 27 (2013).
- Ю. И. Гурфинкель, В. В. Любимов, В. Н. Ораевский и др., *Биофизика* **40** (4), 793 (1995).
- А. Л. Бучаченко, *Успехи химии* **83** (1), 1 (2014).
- M. S. Goldberg, N. Giannetti, R. T. Burnett, et al., *Occup. Environ. Med.* **65** (10), 659 (2008).
- В. В. Зинчук, С. В. Гацуря и Н. В. Глуткина, *Коррекция кислородтранспортной функции крови при патологии сердечно-сосудистой системы* (ГрГМУ, Гродно, 2016).
- A. Guduru, T. G. Martz, A. Waters, et al., *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.* **57** (13), 5278 (2016).
- D. Verhoeven, J. Teijaro, and D. L. Farber, *Virology* **390** (2), 151 (2009).
- P. Kamseng, S. Trakulsrichai, O. Trachoo, et al., *Hematology* **22** (2), 114 (2017).
- S. R. Malin and B. J. Srivastava, *Nature* **277**, 646 (1979).
- E. Stoupel, E. Abramson, J. Sulkes, et al., *Int. J. Biometeorol.* **38** (4), 199 (1995).
- G. Cornélissen, F. Halberg, T. Breus, et al., *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* **64**, 707 (2002).
- М. Г. Плисс, Н. В. Кузьменко и В. А. Цырлин, *Трансляционная медицина* **4** (6), 13 (2017).

Influence of Weak Geomagnetic Disturbances on Rat's Cardiovascular System in Natural and Shielded Geomagnetic Field Conditions

N.V. Kuzmenko* **, B.F. Shchegolev* *, M.G. Pliss* **, and V.A. Tsyrlin***

**Almazov National Medical Research Centre, Ministry of Health of the Russian Federation,
ul. Akkuratova 2, St. Petersburg, 197341 Russia*

***Pavlov First St. Petersburg State Medical University, ul. Lva Tolstogo 6/8, St. Petersburg, 197022 Russia*

****Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, nab. Makarova 6, St. Petersburg, 199034 Russia*

The study investigates the impact of weak geomagnetic disturbances on systolic blood pressure, R–R interval, low-frequency and high-frequency components and its ratio of the heart rate variability spectrum in natural and shielded geomagnetic field conditions. All tests were performed with male Wistar rats placed into simulation and shielded chambers. In the simulation chamber on the days of geomagnetic disturbances significant shifts were observed in the investigated parameters: a rise in systolic blood pressure, as well as an increase in the ratio of low to high frequency components of the heart rate variability spectrum. In the shielded chamber, the parameters under quiet and disturbed geomagnetic field were not considerably different. In addition, in the simulation chamber, the value of the mean daily barometric pressure was inversely correlated with systolic blood pressure, this relationship was significantly weakened in shielded geomagnetic field conditions. It was concluded that weak geomagnetic disturbances affect cardiovascular and autonomic nervous system functions. The authors hypothesize that the enhanced effect of a slight decrease in barometric pressure on systolic blood pressure in the natural geomagnetic field could be associated with the impact of geomagnetic activity on blood oxygenation mechanisms.

Keywords: geomagnetic activity index, magnetic field, shielding, arterial blood pressure, R–R interval, heart rate variability