DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643117 EDN: VLAXWX

Соотношение эффектов синхронизации вариаций геомагнитного поля с колебаниями сердечного ритма и параметров его вегетативной регуляции

Т.А. Зенченко[1, 2], Л.В. Поскотинова[3], Н.И. Хорсева[4], Т.К. Бреус[2]

[1] Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, Пущино, Россия;
[2] Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия;
[3] Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. акад. Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук, Архангельск, Россия;
[4] Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Вариации геомагнитного поля являются важным экологическим фактором, оказывающим серьёзное влияние на самочувствие и функциональное состояние человека, в первую очередь на сердечно-сосудистую систему. В то же время остаются неясными не только биофизический механизм такого влияния, но и его феноменологическая картина на разных пространственно-временных масштабах. В данной работе продолжено исследование обнаруженного нами ранее эффекта синхронизации колебаний сердечного ритма человека в покое с вариациями геомагнитного поля в миллигерцовом диапазоне частот (периоды 3–40 мин; эффект биогеосинхронизации).

Цель. Оценка вклада регуляторных влияний вегетативной нервной системы при формировании реакции частоты сердечных сокращений организма человека на вариации геомагнитного поля.

Материалы и методы. В течение 2012–2024 гг. проведено 673 эксперимента по регистрации кардиоинтервалограммы в покое у восьми практически здоровых волонтёров (1-я группа, многократные регистрации каждого испытуемого длительностью 100–120 мин) и в группе из 39 человек (2-я группа, однократные регистрации длительностью 60 мин). Сравнивали частоту возникновения эффекта биогеосинхронизации ежеминутных временны́х рядов частоты сердечных сокращений и временны́х параметров варибельности сердечного ритма. Использованы методы кросскорреляционого анализа и вейвлет-анализа.

Результаты. Распределение процента случаев синхронизации параметров частоты сердечных сокращений и варибельности сердечного ритма с компонентами вектора геомагнитного поля, полученное в целом по всей выборке экспериментов, при использовании корреляционного метода анализа даёт для частоты сердечных сокращений значение 32%, а для показателей вариации сердечного ритма — 9–17%, то есть различия составляют два раза и более. По критерию сходства вейвлет-спектров эффект синхронизации по частоте сердечных сокращений наблюдается в 40% случаев, по параметрам варибельности сердечного ритма — в 24–28%. Выборочные распределения, полученные индивидуально для каждого волонтёра 1-й группы и совокупно для всех волонтёров 2-й группы, показали сходные результаты.

Заключение. Эффект биогеосинхронизации проявляется в динамике показателя частоты сердечных сокращений статистически значимо чаще (p <0,001), чем в динамике параметров варибельности сердечного ритма, как при рассмотрении результатов многократных индивидуальных наблюдений, так и при анализе группы волонтёров.

Ключевые слова: солнечно-биосферные связи; биоритмология; синхронизация ритмов; вариации геомагнитного поля; магниточувствительность; сердечный ритм; сердечно-сосудистая система.

Как цитировать:
Зенченко Т.А., Поскотинова Л.В., Хорсева Н.И., Бреус Т.К. Соотношение эффектов синхронизации вариаций геомагнитного поля с колебаниями сердечного ритма и параметров его вегетативной регуляции // Экология человека. 2024. Т. 31, № 10. С. 750–767. DOI: 10.17816/humeco643117 EDN: VLAXWX

Рукопись поступила: 17.12.2024 **Рукопись одобрена:** 03.03.2025 **Опубликована online:** 27.04.2025

ЭКО • ВЕКТОР

Распространяется на условиях лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International
© Эко-Вектор, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643117 EDN: VLAXWX

Synchronization Between Geomagnetic Field Variations and Human Heart Rate Parameters: Possible Role of Autonomic Nervous System

Tatiana A. Zenchenko[1, 2], Liliya V. Poskotinova[3], Natalia I. Khorseva[4], Tamara K. Breus[2]

[1] Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia;
[2] Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
[3] N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia;
[4] Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ABSTRACT

***BACKGROUND*:** *Geomagnetic field variations* are a significant environmental factor influencing human well-being and physiological state, particularly the cardiovascular system. However, both the biophysical mechanisms underlying this influence and its phenomenological patterns across various spatiotemporal scales remain poorly understood. This study continues the investigation of the previously identified effect of synchronization between resting heart rate oscillations and geomagnetic field variations within the millihertz frequency range (periods of 3–40 minutes), referred to as the "biogeosynchronization effect."

***AIM*:** To evaluate the possible role of the autonomic nervous system as a mediating pathway in the human body's response to geomagnetic field variations.

***METHODS*:** From 2012 to 2024, a total of 673 experiments involving resting-state electrocardiographic interval recordings were conducted in two groups: eight healthy volunteers (group 1), each undergoing multiple sessions lasting 100–120 minutes, and a cohort of 39 individuals (group 2), each with a single 60-minute session. The frequency of biogeosynchronization effects in minute-by-minute time series of heart rate and heart rate variability parameters was compared. Cross-correlation and wavelet analysis methods were employed.

***RESULTS*:** Across the entire dataset, synchronization between heart rate parameters and components of the geomagnetic field vector occurred in 32% of cases, whereas heart rate variability parameters showed synchronization in only 9%–17%, according to correlation analysis, representing a two-fold or greater difference. Based on wavelet spectrum similarity, heart rate synchronization was observed in 40% of cases and heart rate variability parameters synchronization in 24%–28%. Individual distributions for each subject in group 1 and pooled results for group 2 revealed similar patterns.

***CONCLUSION*:** The biogeosynchronization effect appears significantly more frequently in heart rate changes ($p < 0.001$) than in heart rate variability parameters, both in repeated individual recordings and in group-level analysis.

Keywords: solar-biospheric interactions; biorhythmology; rhythm synchronization; geomagnetic field variations; magnetosensitivity; heart rate; cardiovascular system.

To cite this article:
Zenchenko TA, Poskotinova LV, Khorseva NI, Breus TK. Synchronization Between Geomagnetic Field Variations and Human Heart Rate Parameters: Possible Role of Autonomic Nervous System. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology).* 2024;31(10):750–767. DOI: 10.17816/humeco643117 EDN: VLAXWX

Received: 17.12.2024 **Accepted:** 03.03.2025 **Published online:** 27.04.2025

ECO•VECTOR
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2024

DOI: https://doi.org/10.17816/humeco643117 EDN: VLAXWX

地磁场变化与人体心律参数之间的同步效应：植物神经系统的潜在作用

Tatiana A. Zenchenko[1, 2], Liliya V. Poskotinova[3], Natalia I. Khorseva[4], Tamara K. Breus[2]

[1] Institute of Theoretical and Experimental Biophysics of the Russian Academy of Sciences, Pushchino, Russia;
[2] Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
[3] N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, Russia;
[4] Institute of Biochemical Physics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

摘要

背景。地磁场变化是一种重要的生态因素，对人体健康和功能状态，尤其是心血管系统具有显著影响。然而，其生物物理作用机制以及在不同时间和空间尺度上的现象表现尚不明确。本文延续了我们此前关于人体静息状态下心律波动与毫赫兹频段地磁场变化（周期为3－40分钟）之间同步现象（即“生物-地磁同步效应”）的研究。

目的。评估植物神经系统作为人体对地磁场变化反应中介环节的可能作用。

材料与方法。2012年至2024年期间，共进行了673次静息状态下的心率间期图记录实验。第一组为8名基本健康志愿者，每人进行多次记录（每次100－120分钟）；第二组为39人，仅记录一次（时长60分钟）。比较两组受试者逐分钟的心率与心率变异性时间序列中生物-地磁同步效应的发生频率。分析方法包括交叉相关分析与小波分析。

结果。在全部实验样本中，采用相关分析法，心率参数与地磁场矢量分量的同步出现率为32%，而心率变异性指标的同步率为9－17%，差异达两倍以上。根据小波谱相似性标准，心率同步效应的发生率为40%，心率变异性参数为24－28%。第一组每位志愿者及第二组整体的结果分布基本一致。

结论。在个体多次观测结果与志愿者群体分析中均可见，与心率变异性参数相比，心率指标的动态变化更频繁且在统计学上显著地（$p < 0.001$）呈现出生物-地磁同步效应。

关键词：日地-生物相互作用；生物节律学；节律同步；地磁场变化；磁敏感性；心律；心血管系统。

引用本文：
Zenchenko TA, Poskotinova LV, Khorseva NI, Breus TK. 地磁场变化与人体心律参数之间的同步效应：植物神经系统的潜在作用. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology).* 2024;31(10):750–767. DOI: 10.17816/humeco643117 EDN: VLAXWX

收到: 17.12.2024 **接受:** 03.03.2025 **发布日期:** 27.04.2025

ECO•VECTOR
The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License
© Eco-Vector, 2024

ОБОСНОВАНИЕ

Одной из современных фундаментальных междисциплинарных научных проблем является выяснение механизмов реакции биологических систем (от молекулярного до организменного уровня) на действие низкоинтенсивных факторов окружающей среды, к числу которых относятся и факторы космической погоды. Многократно было показано, что сильные вспышки на Солнце, приходы к Земле облаков космической плазмы, Форбуш-понижения, планетарные магнитные бури сопровождаются резким возрастанием числа сердечно-сосудистых катастроф (инфарктов, инсультов, случаев внезапной смерти) [1–5].

Обнаружено, что влияние на организм человека оказывают не только перечисленные выше экстремальные явления космической погоды, но и умеренные возрастания геомагнитной активности (ГМА). В этих случаях действие внешних факторов проявлялось уже не в виде обострения заболеваний или смерти, а в виде значимого изменения средних значений физиологических показателей, характеризующих состояние различных систем организма: эндокринной [6], нервной [7], сердечно-сосудистой [8, 9]. Важно отметить, что реакции на факторы космической погоды наблюдались не только у пациентов с нарушениями функций соответствующих систем, но и у практически здоровых людей, в том числе молодых [10].

Все эти результаты указывали на то, что явления космической погоды — это важный экологический фактор, изучение которого необходимо как для фундаментального понимания процессов взаимодействия живых систем с окружающей средой, так и для практической защиты человека от вредной стороны этого воздействия.

Одним из сложных моментов в решении данной проблемы является системность ответа организма на действие внешнего фактора. Например, во время геомагнитных бурь наблюдаются значимые изменения целого перечня физиологических показателей: возрастает уровень артериального давления (АД) [9] и частоты сердечных сокращений (ЧСС) [3], изменяются значения показателей состояния сосудистого тонуса (скорость распространения пульсовой волны и эндотелиальная функция) [8] и микроциркуляции крови [11] и многие другие.

Вегетативная нервная система (ВНС), как было многократно показано и на популяционном, и на индивидуальном уровне, является одной из систем организма, которая реагирует на изменение ГМА, причём картина симптомов развития инфарктов миокарда, ассоциированных с магнитными бурями, включает в себя и резкое снижение вариабельности сердечного ритма (ВСР) [1, 6, 12].

Так, обсервационные исследования показывают, что в день геомагнитного возмущения показатель ВСР SDNN понижается по сравнению со спокойными днями примерно на 23%, а также происходит уменьшение полной спектральной мощности сердечного ритма, которая изменяется в основном за счёт существенного снижения мощности низкочастотных (LF) и очень низкочастотных (VLF) компонент спектра, то есть за счёт активности симпатического звена вегетативной регуляции нервной системы и барорефлекторных центров регуляции [1, 12, 13]. В то же время многие исследователи подчёркивали, что реакция показателей ВСР на действие ГМА носит индивидуальный характер [14, 15].

В лабораторных экспериментах обнаружено значительное снижение ВСР у кроликов во время магнитной бури, что, по мнению авторов, указывает на вовлечённость механизма барорефлекса в наблюдаемый эффект [16]. В то же время влияние искусственных магнитных полей (МП) на параметры ВСР человека зависело от характеристик МП, и при разных параметрах поля могло приводить как к повышению, так и понижению уровня стресса [17]. Однако из-за существования огромного числа обратных связей и механизмов регуляции в границах данной постановки эксперимента (как натурного, так и лабораторного) невозможно различить, какие из наблюдаемых изменений в организме являются непосредственным следствием действия вариаций МП, а какие — уже опосредованным, обусловленным именно взаимосвязанностью изучаемых процессов.

Около двух десятилетий назад появились сообщения о наблюдении эффекта подстройки частоты различных биологических ритмов, в первую очередь ЧСС и параметров электроэнцефалограммы, под близкие по частотам вариации геомагнитного поля (ГМП). Сначала это явление было обнаружено для герцового диапазона частот, включающего частоты первых мод Шумановских резонансов (8–14 Гц) и геомагнитных пульсаций PC1 (Pulsation Continuous, 0,5–2,0 Гц) [18, 19]. Эти результаты были подтверждены в лабораторных исследованиях [15, 20–23].

Несколько позже аналогичный результат был получен нами для миллигерцового диапазона частот (периоды колебаний 3–40 мин). Было обнаружено, что динамика сердечного ритма здорового человека в покое проявляет статистически значимую связь с вариациями вектора ГМП [24]. Впоследствии также показано, что основные периоды колебаний, присутствующие в вейвлет-спектрах рядов ЧСС и синхронных им вариаций ГМП в течение каждого интервала времени наблюдений (1–2 ч), в значительной мере совпадают [25, 26]. Эффект наблюдался как в сериях экспериментов, проведённых многократно на одном и том же волонтёре [24, 25], так и при измерениях в группах здоровых волонтёров и лиц с артериальной гипертензией [24, 27]. Важным условием его регистрации было состояние покоя (но не сна) испытуемых, то есть минимизация помех, создаваемых другими факторами, влияющими на сердечный ритм. Поскольку регистрируемые периоды колебаний варьировали от эксперимента к эксперименту, то предположение о случайном совпадении набора собственных частот в двух колебательных процессах (биологическом и геофизическом) было нами отвергнуто. В качестве рабочей принята гипотеза, что данный эффект заключается

в подстройке частоты колебаний определённого биологического процесса под близкие по величине частоты, присутствующие в данный момент в спектре вариаций ГМП [25], и имеет ту же природу, что и описанный в работах [1, 15, 18–23] и многих других, только в миллигерцовом диапазоне, который ранее не исследовали. Мы обозначили его термином «эффект биогеофизической синхронизации» применительно к исследуемому диапазону частот 0,5–5,0 мГц, однако, по-видимому, он применим к намного более широкому диапазону, как минимум, от СВЧ [28] до колебаний космических ритмов с периодом в десятки лет [29].

Цель исследования. С учётом многочисленных свидетельств о включённости ВНС в развитие реакции организма на магнитные бури нами высказано предположение, что за формирование эффекта биогеосинхронизации как одного из промежуточных этапов развития такой реакции также могут быть ответственны механизмы регуляции вегетативного баланса [24]. С целью проверки данной гипотезы на большом материале наблюдений выполнено сравнение частоты проявления эффекта биогеосинхронизации в динамике временны́х рядов ЧСС и статистических параметров ВСР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальные данные

Выполнено обсервационное исследование с временны́ми (продольными) сериями, по результатам которого получены 673 длительных (от 60 до 120 мин) записи кардиоинтервалограммы (КИГ) у волонтёров. Критериями включения в эксперимент являлись готовность участников к длительным и многократным измерениям кардиоритмограммы, возраст от 20 до 55 лет, принадлежность к первой и второй группам здоровья по результатам профилактических медицинских осмотров. Критериями невключения в эксперимент являлись признаки артериальной гипертензии и её осложнений, нарушения сердечного ритма, лёгочная патология. Участники не принимали фармакологических препаратов, влияющих на функции кардиореспираторной системы, а также не посещали спортзалы для активных физических нагрузок. Для волонтёров 1-й группы (8 человек) регистрацию КИГ производили многократно (не менее 10 раз для каждого, всего 622 эксперимента), а для волонтёров 2-й группы (39 человек) — от одного до трёх раз (всего 51 эксперимент). Сравнение результатов, полученных при двух различных дизайнах эксперимента, продольном (1-я группа) и поперечном (2-я группа), является важным, так как в гелиобиологии значительный вклад потенциально могут вносить межиндивидуальная вариабельность реакций и вклад состояния окружающей обстановки.

Измерения выполняли на протяжении 2012–2024 гг. в Московской, Ленинградской и Архангельской областях. Общая информация о волонтёрах 1-й группы приведена в табл. 1; 2-я группа включала 39 человек (14 мужчин и 25 женщин) в возрасте 38±15 лет. В последующем на основании ведения дневников самонаблюдения участников

Таблица 1. Список волонтёров 1-й группы, анамнестические данные и средние значения измеряемых параметров. Средние значения показателей даны в формате Me (1 кв.; 3 кв.)
Table 1. List of volunteers of Group 1, anamnestic data and mean values of measured parameters. Mean values of indicators are given in the format Me (1 sq.; 3 sq.)

Номер волонтёра The volunteer's number	Пол Gender	Возраст, лет Age, years	*n*	ЧСС| HR	RMSSD	SDNN	AMo	Стресс-индекс Stress index
V1	Ж F	59	333	69,3 (65,2; 73,0)	21,9 (16,5; 27,9)	26,7 (20,9; 32,4)	59,8 (53,88; 66,0)	334,9 (239,6; 485,8)
V2	Ж F	45	165	61,6 (59,6; 63,6)	36,9 (29,4; 45,9)	31,7 (27,7; 35,5)	52,6 (47,3; 57,2)	197,1 (157,3; 234,8)
V3	Ж F	30	64	63,8 (60,2; 69,2)	45,3 (35,8; 52,9)	48,4 (41,3; 52,3)	38,7 (36,7; 44,0)	100,1 (83,4; 141,8)
V4	M M	37	19	78,7 (75,6; 79,7)	18,8 (16,4; 21,6)	39,0 (36,0; 41,6)	46,6 (44,5; 48,3)	215,0 (185,5; 232,6)
V5	Ж F	53	10	80,1 (74,3; 80,3)	19,5 (17,5; 23,4)	28,0 (26,7; 30,4)	55,1 (51,8; 57,6)	308,8 (260,4; 358,7)
V6	M M	59	10	62,5 (60,5; 63,1)	18,2 (16,5; 21,6)	25,0 (23,0; 29,0)	60,9 (57,9; 63,6)	309,6 (249,0; 380,7)
V7	Ж F	42	11	71,9 (66,5; 73,5)	42,1 (36,2; 46,4)	45,8 (42,9; 49,9)	42,3 (38,5; 43,1)	128,6 (103,2; 146,6)
V8	Ж F	27	10	77,3 (73,5; 79,0)	40,6 (34,4; 47,4)	58,8 (53,8; 65,9)	33,8 (32,1; 35,8)	88,7 (73,9; 106,9)

Примечание. ЧСС — частота сердечных сокращений; RMSSD — квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов NN; SDNN — стандартное отклонение RR-интервалов; AMo — амплитуда моды.
Note. HR is the heart rate; RMSSD is the square root of the sum of the squares of the difference between the values of consecutive pairs of NN intervals; SDNN is the standard deviation of the RR intervals; AMo is the amplitude of the mode.

к полученным КИГ применили критерии исключения, а именно периоды временной нетрудоспособности (выраженная усталость, психоэмоциональный стресс, острые респираторно-вирусные заболевания), приём кофе в течение 4 ч перед измерениями КИГ.

Для расчёта показателей ВСР использовали КИГ, полученную при регистрации ЭКГ-канала в I стандартном отведении в положении лёжа, в покое, в состоянии бодрствования, после 10-минутной адаптации к положению покоя.

Соблюдение этических стандартов

Исследование проведено без риска для здоровья людей с соблюдением всех принципов гуманности и этических норм (Хельсинкская декларация WMA, 2013) и одобрено комитетом по биоэтике ИТЭБ РАН (протокол № 06/2012 от 01.06.2012). Получено информированное согласие каждого волонтёра на участие в данном исследовании.

На основе записи КИГ получены временны́е ряды (длительностью 60–120 точек (мин) каждый) ежеминутных значений следующих показателей ВСР [30]:

1) ЧСС, уд/мин – пульс;

2) RMSSD, мс — квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов NN; отражает вагусное влияние на ритм сердца;

3) SDNN, мс — стандартное отклонение RR-интервалов; отражает общую ВСР, а также при коротких записях вагусное влияние на ритм сердца;

4) AMo, % — амплитуда моды, то есть число RR-интервалов, соответствующих значению моды, в процентах к объёму выборки; отражает симпатические влияние на ритм сердца;

5) SI — стресс-индекс, SI=AMo/2Mo×MxDMn, где показатель AMo приведён в процентах, а Mo и MxDMn — в секундах; отражает симпатическое влияние на ритм сердца.

Эти показатели сопоставили с синхронными временны́ми рядами ежеминутных значений X и Y компонент ГМП (в нТл) по геофизической станции, ближайшей к месту измерений.

Геофизические данные

В качестве геофизических показателей выбраны одноминутные значения горизонтальных компонент X и Y вектора ГМП по данным геомагнитных станций, расположенных на наименьшем расстоянии от каждого из пунктов проведения измерений. Для Московской области (55°45′ N / 37°36′ E) были использованы данные геофизической станции Борок (BOX, 58.070 N, 38.230 E), для Ленинградской и Архангельской области (59°57′ N / 30°19′E) — станции Нурмиярви (NUR, 60.500 N, 24.600 E). Данные были получены из сети INTERMAGNET (https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINForms2).

Для сравнения были выбраны значения вариаций именно горизонтальных компонент вектора ГМП, поскольку они слабо изменяются с увеличением расстояния до точки измерения, что было отдельно проверено [26]. В отличие от них ежеминутные вариации вертикальной составляющей (Z) в значительной степени зависят от подстилающей поверхности в точке проведения измерений. Следовательно, при достаточно значительном расстоянии от места проведения биологических измерений до геофизической станции (какие имели место в некоторых экспериментах данного исследования) использование данных по динамике Z-компоненты и, как следствие, полному вектору ГМП, является, на наш взгляд, неправомерным. В то же время ранее в работах, где точки проведения биологических наблюдений находились в непосредственной близости от геомагнитных станций, были включены в рассмотрение и вариации вертикальной компоненты вектора ГМП, и полного вектора [24, 27, 31].

В ряде более ранних работ по данному эффекту были использованы только записи ВСР, выполненные в спокойных геомагнитных условиях [24, 26, 27, 31]. В данном исследовании мы не делали различения по уровням возмущённости ГМП, поскольку ранее показано [25], что частота возникновения эффекта синхронности не зависит от уровня возмущённости ГМП, определяемому по суточным значениям Кр-индекса. Кроме того, сравниваемые нами физиологические показатели (ЧСС и показатели ВСР) были измерены при одном и том же наборе значений параметров космической погоды.

Алгоритм анализа данных

Расчёты производили в программной среде MATLAB R2018 посредством встроенных функций и специально разработанных приложений.

Алгоритм анализа, основанный на сочетании методов кросскорреляционного и вейвлет-анализа, подробно описан [25].

Геофизические и биологические временны́е ряды были предварительно отфильтрованы полосовым фильтром для исключения тренда и крайне низкочастотных колебаний.

Корреляционный анализ. Поскольку как биологические, так и геофизические временны́е ряды в значительном числе случаев не удовлетворяли критерию нормального распределения, для оценки степени корреляционной связи выбрали ранговый коэффициент корреляции Спирмена, для которого оценка уровня статистической значимости не чувствительна к форме распределения.

Как было упомянуто выше, одним из проявлений эффекта биогеосинхронизации является одновременное присутствие в обоих временны́х рядах близких по частоте квазипериодических колебаний, причём значение возможного сдвига фаз априори неизвестно (это утверждение было выбрано в качестве альтернативной гипотезы H1, при том что нулевая гипотеза H0 заключается в том, что между рядами нет связи). Для выявления таких ситуаций мы использовали следующий алгоритм: оценивали

значение коэффициента корреляции при временны́х сдвигах биологического и геофизического рядов в диапазоне от –5 до +5 мин (всего 11 возможных лагов). Из полученных 11 коэффициентов корреляции выбирали максимальный по модулю и оценивали уровень его статистической значимости *p*.

Поскольку тестирование 11 временны́х лагов вместо одного приводит к увеличению вероятности принятия ложноположительных гипотез, мы применяли поправку Бонферрони. Метод поправки Бонферрони утверждает, что для уменьшения ложноположительных результатов необходимо отклонить те гипотезы, для которых значение $p < \alpha/m = 0{,}05/11 = 0{,}0045$.

Поскольку в разных экспериментах исследования размер экспериментальной выборки (длина временны́х рядов) варьировал от 60 до 120 значений, прямое сравнение результатов в виде значений коэффициентов корреляции было бы неправомерным. Однако допустимо сравнение значений уровня статистической значимости *p*. Для удобства анализа и графического представления результатов использовали логарифмическую форму значения *p* с учётом знака коэффициента корреляции: $Ks = -\mathrm{sign}(r_s) \times \lg(p)$. Такая форма представления результатов имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционной (пары значений r_s и *p*) при анализе больших массивов. Во-первых, использование Ks позволяет оперировать одним показателем вместо двух, во-вторых, даёт возможность сравнивать и отобра́жать на графиках результаты, полученные на временны́х рядах разной длины, в-третьих, Ks возрастает (а не уменьшается, как *p*) при повышении степени корреляционной зависимости, что психологически привычнее. Всё это упрощает анализ результатов, не приводя при этом к потере информации, поскольку соответствие между Ks и парами значений r_s и *p* является взаимно-однозначным. При этом значения Ks больше 1,3 и Ks меньше –1,3 (где $1{,}3 = -\log(0{,}05)$) означают наличие, соответственно, положительной и отрицательной корреляции с уровнем значимости $p < 0{,}05$, $|Ks| > 2$ — наличие корреляции с уровнем значимости $p < 0{,}01$, а $|Ks| < 1{,}3$ – отсутствие статистически значимой корреляции. В данном исследовании с учётом введённых поправок граничное значение, соответствующее $\alpha = 0{,}0045$, составило $|Ks| = -\lg(0{,}0045) = 2{,}35$.

Метод оценки сходства вейвлет-спектров. Для каждого из 673 проанализированных экспериментов ряды значений ЧСС и параметров ВСР, а также X и Y компонент ГМП были преобразованы согласно следующему алгоритму:

1) вычислены матрицы вейвлет-коэффициентов $W(h)_i$, $W(x)_i$, $W(y)_i$, i=1...673, отражающих значения спектральной плотности, размером W ($50 \times D_i$ значений), где 50 — количество тестируемых периодов в диапазоне от 1 до 50 мин, D_i — длительность *i*-того эксперимента в минутах. Была использована стандартная комплексная функция вейвлет-преобразования Морле;

2) для полученных матриц $W(h)_i$, $W(x)_i$, $W(y)_i$ вычисляли среднее значение спектральной плотности представленных периодов (посредством усреднения значений по каждой строке 1...50). В результате были получены векторы $[h]_i$, $[x]_i$, $[y]_i$, размерности 1×50, отражающие интенсивность каждого из периодов соответственно в рядах ЧСС, X и Y *i*-того эксперимента;

3) в качестве численного показателя, характеризующего степень сходства/различия набора периодов, представленных в вейвлет-спектрах для пары рядов, например, ЧСС–Y, было использовано скалярное произведение векторов $[h]_i$, и $[y]_i$, нормированное на их длину: $Qy_i = (h_i, y_i)/|h_i| \cdot |y_i|$.

По математическому смыслу значение параметра Q_y эквивалентно косинусу угла между векторами *[h] и [y]* или коэффициенту корреляции между ними. Однако соседние значения этих векторов не являются независимыми, потому к ним не применимы стандартные алгоритмы оценки уровня статистической значимости. Именно поэтому граница значений параметров Q_x и Q_y, при которых два вектора считались «сонаправленными», а соответствующие им спектры — сходными, была выбрана эмпирически на уровне $Q \geqslant 0{,}4$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На примере одного эксперимента (волонтёр V2, начало измерений 11.06.2013, 07:00 UT) показаны основные этапы двух применённых алгоритмов анализа: корреляционного (рис. 1) и метода оценки сходства вейвлет-спектров (рис. 2).

В табл. 2 приведены численные результаты сравнения данных временны́х рядов двумя методами. Считалось, что ряды сходны при оценке корреляционным методом при $|Ks| > 2{,}35$, методом оценки вейвлет-спектров — при $Q_x > 0{,}4$.

Видно, что для всех четырёх рядов на рис. 2 максимальная спектральная плотность соответствует периоду 18–19 мин, а ещё один пик, меньшей интенсивности, соответствует примерно 9–10 мин. Из табл. 2 видно, что степень корреляционной связи с ГМП монотонно убывает от ЧСС к SI и в случае SI практически совпадает с нижней границей уровня статистической значимости. В то же время в случае критерия сходства вейвлет-спектров можно говорить, что она примерно одинакова для трёх рассмотренных физиологических показателей (ФП).

На рис. 3 показаны результаты анализа массива из всех 673 экспериментов методом кросскорреляционного анализа (рис. 3a) и методом сравнения вейвлет-спектров (рис. 3b). По оси ординат приведено значение частоты встречаемости эффекта синхронизации *N* (или относительное число экспериментов, в которых наблюдался эффект синхронизации данного ФП с конкретной компонентой ГМП: $N = N_k/n$, где N_k — число экспериментов, в которых обнаружен эффект синхронизации

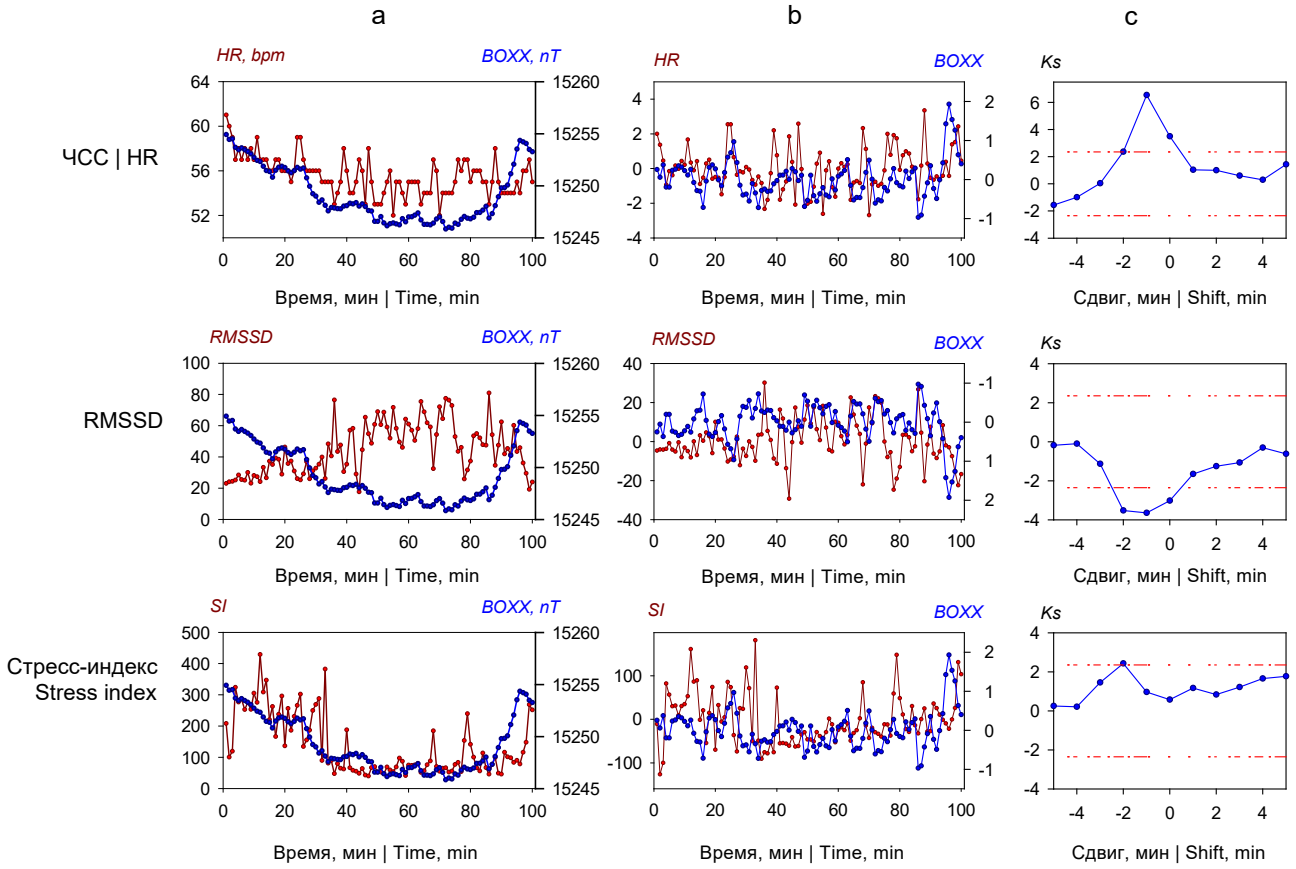

Рис. 1. Иллюстрация корреляционного метода оценки синхронизации физиологических показателей частоты сердечных сокращений (ЧСС), RMSSD, SI с вариациями X компоненты геомагнитного поля (ГМП): a — наложение исходных рядов физиологических показателей (красным) и горизонтальной компоненты ГМП по геофизической станции Борок (BOXX, синим); b — наложение отфильтрованных временных рядов; c — функции кросскорреляции между значениями физиологического показателя и вектора ГМП. Ks=–lg(*p*)*sign(*r*), где *r* — значение коэффициента корреляции Спирмена, *p* — уровень его статистической значимости. Красный пунктир соответствует граничному уровню статистической значимости *p*=0,0045 (|Ks|>2,35).

Fig. 1. Illustration of the correlation method for assessing the synchronization of physiological parameters HR, RMSSD, Stress index with variations in the X component of the GMF: a — superposition of the original physiological parameters series (red) and the horizontal component of the GMF at the Borok geophysical station (BOXX, blue); b — superposition of the filtered time series; c — cross-correlation functions between the values of the physiological parameter and the GMF vector. Ks=–lg(*p*)*sign(*r*), where *r* is the value of the Spearman correlation coefficient, *p* is its level of statistical significance. The red dotted line corresponds to the boundary level of statistical significance *p*=0.0045 (|Ks|>2.35).

согласно корреляционному или спектральному критерию, а *n* — общее число экспериментов, включённых в анализ; в случае рис. 3 *n*=673).

Из рис. 3a видно, что при использовании корреляционного метода анализа частота встречаемости эффекта синхронизации *N* показателя ЧСС с каждой из выбранных компонент ГМП составляет примерно 32%, а показателей ВСР — 9–17%, то есть различия составляют два раза и более. По критерию сходства вейвлет-спектров эффект синхронизации временнóго ряда значений ЧСС с вариациями компонент ГМП наблюдался в 40% случаев, параметров ВСР — 24–28%.

По критерию χ^2 в обоих видах анализа частота встречаемости эффекта синхронизации *N* показателя ЧСС отличается от аналогичной частоты каждого из четырёх рассмотренных показателей ВСР на уровне статистической значимости (***, *p* <0,001), причём это утверждение верно для обеих компонент ГМП.

На рис. 4 показаны частичные выборочные распределения значений *N*, аналогичные распределениям рис. 3a, но построенные по результатам корреляционного анализа отдельно для каждого из восьми волонтёров 1-й группы, а на рис. 5 — по результатам вейвлет-анализа (аналогично рис. 3b). Наконец, на рис. 6 приведены распределения значений *N* по результатам двух видов анализа для 39 волонтёров 2-й группы. В сумме распределения, показанные на рис. 4–6, составляют соответствующие распределения рис. 3.

Как можно видеть из табл. 1, среди волонтёров 1-й группы существует значительная неравномерность в распределении числа экспериментов в индивидуальных выборках: для волонтёра V1 *n*=333, для волонтёров V5, V6, V8 *n*=10 (опыт показывает, что это минимальный размер индивидуальной выборки, позволяющий увидеть какие-то, если не устойчивые закономерности, то определённые тенденции, особенно, если таких волонтёров несколько).

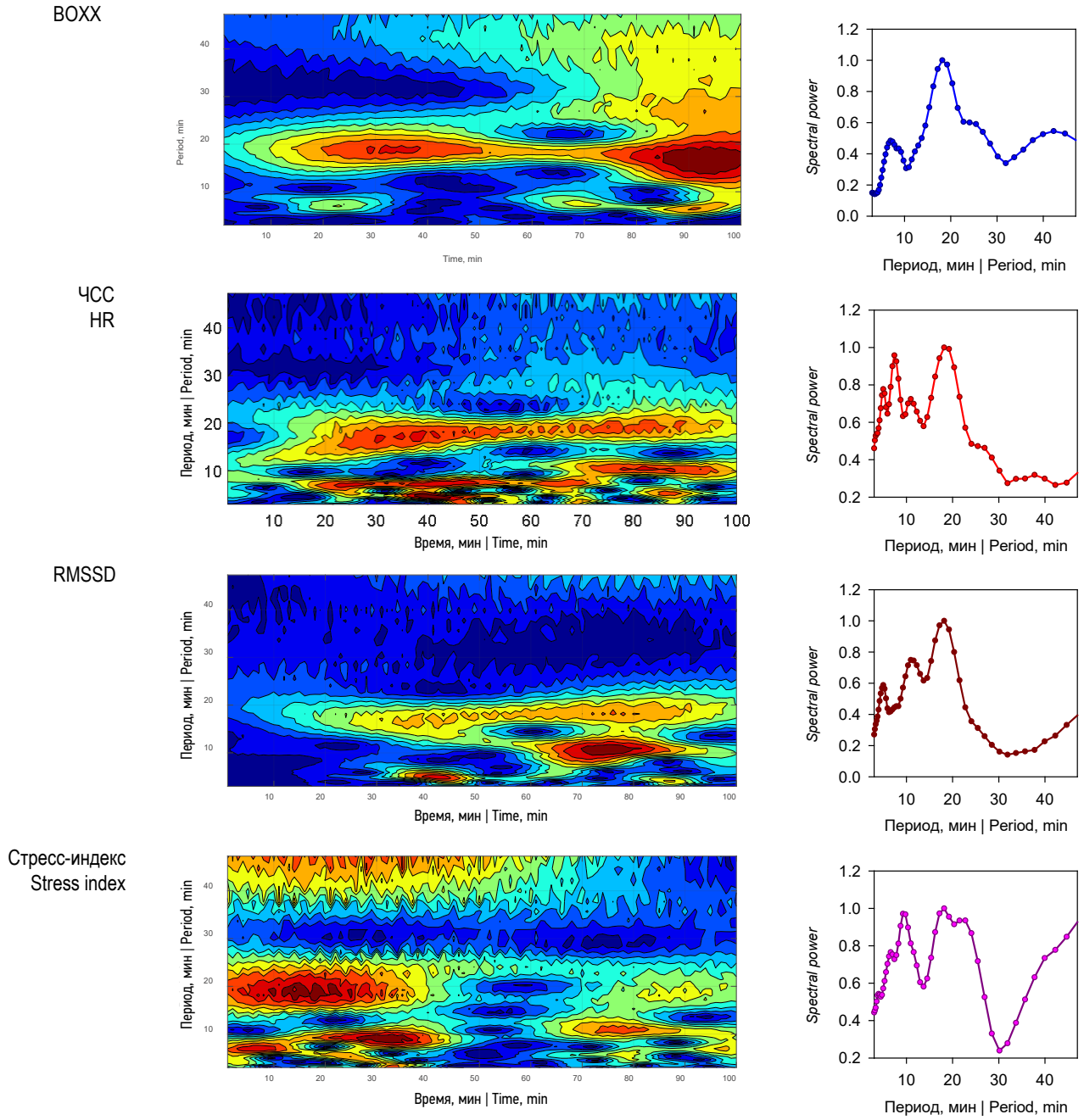

Рис. 2. Иллюстрация метода сравнения вейвлет-спектров: слева — вейвлет-спектры временны́х рядов BOXX, частоты сердечных сокращений, RMSSD, SI; справа — результаты усреднения соответствующих рядов на ось ординат.

Примечание. ЧСС — частота сердечных сокращений; RMSSD — квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов NN.

Fig. 2. Illustration of the method of comparing wavelet spectra. On the left are the wavelet spectra of the BOXX, HR, RMSSD, SI time series. On the right are the results of averaging the corresponding series on the ordinate axis.

Note. HR is the heart rate; RMSSD is the square root of the sum of the squares of the difference between the values of consecutive pairs of NN intervals.

Эта неравномерность приводит к тому, что разброс значений на распределениях рис. 4 для волонтёров V4–V8 значительно выше, чем для V1–V3. Однако такие распределения по индивидуальным выборкам позволяют проследить, в какой мере выводы, полученные по результатам массивной выборки случаев (рис. 3), воспроизводятся при анализе его отдельных непересекающихся подмножеств.

На рис. 4 для шести волонтеров (V1, V2, V3, V5, V6, V8) критерий χ^2 показывает, что частота случаев синхронизации *N* показателя ЧСС хотя бы с одной из компонент ГПМ статистически значимо (не менее чем p <0,05) выше, чем соответствующее значение *N* для любого из показателей ВСР. Для двух остальных волонтёров видна та же тенденция, но небольшой размер выборки не позволяет достигнуть необходимого уровня статистической значимости.

Таблица 2. Пример результатов оценки сходства временны́х рядов физиологических показателей и вектора геомагнитного поля в эксперименте на рис. 1 и 2

Table 2. An example of the results of evaluating the similarity of the time series of physiological parameters and the geomagnetic field vector in the experiment is shown in Fig. 1 and 2

Физиологические показатели Physiological parameters	|Ks|	Q_x
ЧСС	6,53	0,522
RMSSD	3,65	0,574
SI	2,43	0,472

Примечание. ЧСС — частота сердечных сокращений; RMSSD — квадратный корень из суммы квадратов разности величин последовательных пар интервалов NN; SI — стресс-индекс.

Note. ЧСС is the heart rate; RMSSD is the square root of the sum of the squares of the difference between the values of consecutive pairs of NN intervals; SI is the stress index.

Также для волонтёров V1–V6 наблюдается тенденция к небольшому снижению значений *N* в ряду от RMSSD к SI, что аналогично общему распределению на рис. 3а.

Анализ распределений рис. 5 показывает, что статистически значимые отличия значения *N* для ЧСС от аналогичных частот для показателей ВСР наблюдаются у волонтёров V1–V4, то есть в случаях с большими и относительно большими объёмами экспериментальных выборок. Для V7 уровень p <0,05 не достигается, однако значение *N* в случае ЧСС также выше, чем для остальных ФП. Но, в отличие от распределений рис. 4, для волонтёров V5, V6 и V8 не наблюдается превышения *N* ЧСС над частотами остальных ФП, что, скорее всего, объясняется в первую очередь небольшими размерами экспериментальных выборок.

Аналогичную картину можно видеть на рис. 6, где приведены результаты анализа КИГ волонтёров 2-й группы: согласно корреляционному методу оценки (рис. 6а), частота случаев синхронизации параметра ЧСС с обеими компонентами вектора ГМП статистически значимо выше, чем параметров ВСР (p <0,05). В то же время для распределений частоты встречаемости *N* согласно критерию сходства вейвлет-спектров значение *N* для ЧСС выше, чем для других показателей, но это превышение статистически недостоверно.

Если сравнить различные значения *N* на рис. 3а и b, можно видеть, что в первом случае частота возникновения эффекта синхронизации для показателя ЧСС с каждой из компонент вектора ГМП по отношению к аналогичным значениям каждого из четырёх показателей ВСР составляет 1,9–3,5 раза, а во втором — 1,5–1,8, то есть согласно корреляционному критерию различия между ЧСС и параметрами ВСР выражены сильнее, чем при сравнении спектральных характеристик.

Однако как для общего совокупного распределения, так и для каждого из рассмотренных индивидуальных и групповых выборочных распределений мы получаем один и тот же вывод: частота встречаемости эффекта синхронизации показателя ЧСС с вариациями ГМП статистически значимо превышает аналогичные частоты для всех четырёх рассмотренных параметров ВСР. Между самими показателями ВСР (RMSSD, SDNN, AMo, SI) статистически значимых различий нет.

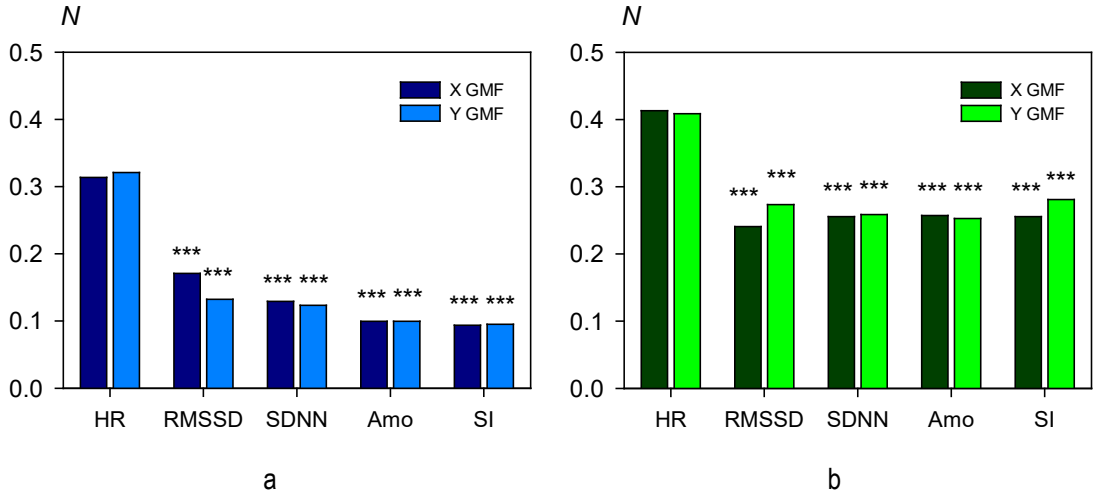

Рис. 3. Суммарное распределение частоты встречаемости эффекта биогеосинхронизации частоты сердечных сокращений (HR) и параметров вариабельности сердечного ритма (ВСР) с каждой из горизонтальных компонент геомагнитного поля (GMF) по всей выборке экспериментов. а — кросскорреляционный метод анализа; b — метод сравнения вейвлет-спектров временны́х рядов. * p <0,05; ** p <0,01; *** p <0,001. Звездочки возле столбцов показателей ВСР обозначают уровень статистической значимости различий между частотами встречаемости эффекта синхронизации для HR и данного показателя ВСР с каждой из компонент GMF.

Fig. 3. The total distribution of the frequency of occurrence of the effect of biogeosynchronization of HR and HRV parameters with each of the horizontal components of the GMF for the whole sample of experiments: a — the cross-correlation method of analysis was used; b — the method of comparing wavelet spectra of time series was used. * p <0.05; ** p <0.01; *** p <0,001. The asterisks near the columns of HRV indicators indicate the level of statistical significance of differences between the frequencies of occurrence of the synchronization effect for HR and a given HRV indicator with each of the GMF components.

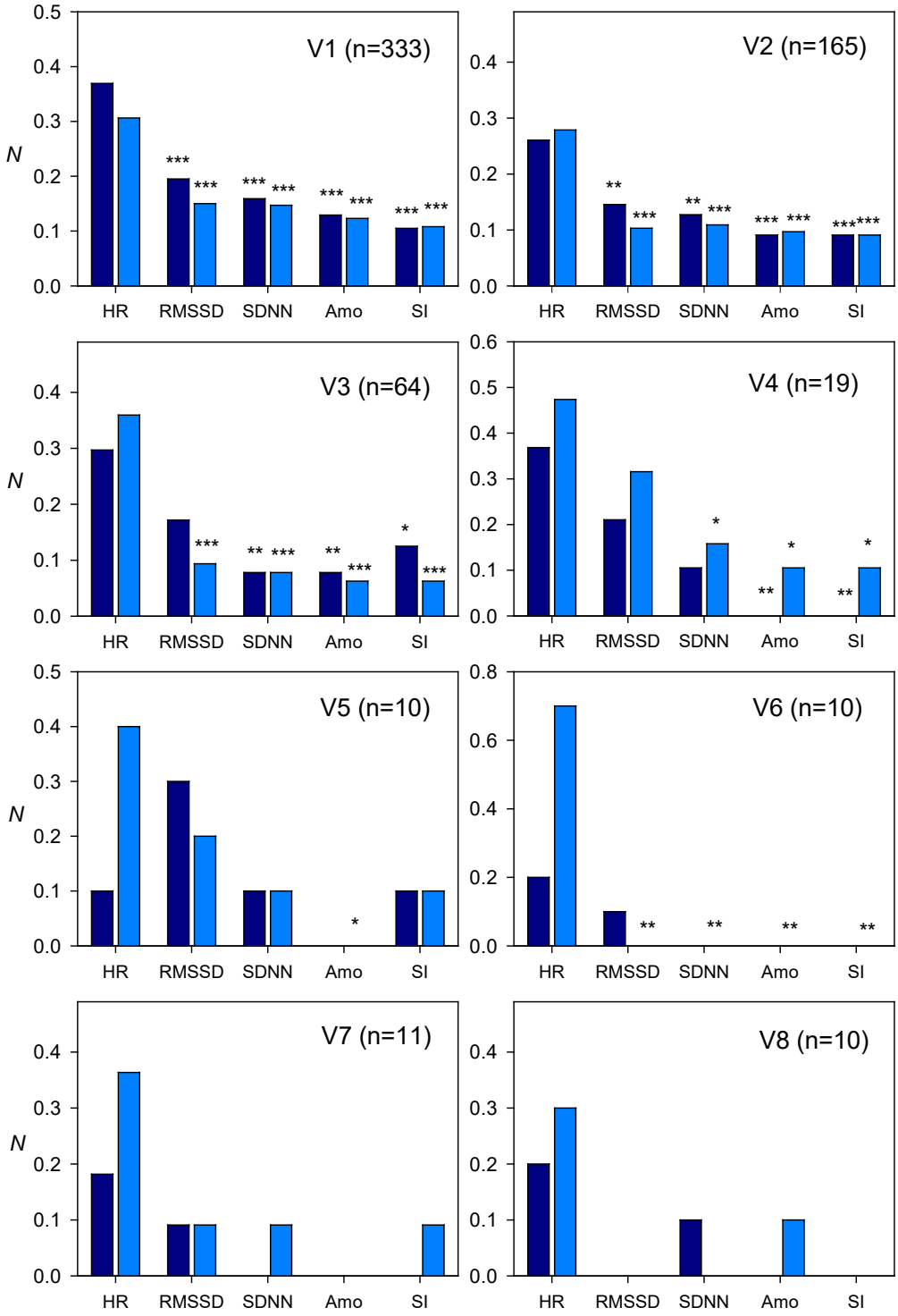

Рис. 4. Выборочные распределения частоты случаев синхронизации показателей частоты сердечных сокращений (HR) и вариабельности сердечного ритма с компонентами геомагнитного поля для волонтёров 1-й группы согласно корреляционному методу. Обозначения как на рис. 3.
Fig. 4. Sample distributions of the frequency of synchronisation of HR and HRV indices with the components of GMF for Group 1 volunteers according to the correlation method. The designations are as in Fig. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ

В данном исследовании получено, что по всей выборке проведённых измерений (673 записи) при использовании корреляционного анализа частота случаев синхронизации показателя ЧСС с каждой из компонент ГМП составляет 32%, а показателей ВСР — 9–17%, то есть наблюдаются различия соответствующих частот в два раза и более. По критерию сходства вейвлет-спектров эффект синхронизации ЧСС с вариациями компонент ГМП наблюдается в 40% случаев, параметров ВСР — 24–28%. Статистически значимые различия частот встречаемости наблюдаются и при анализе отдельных экспериментальных выборок,

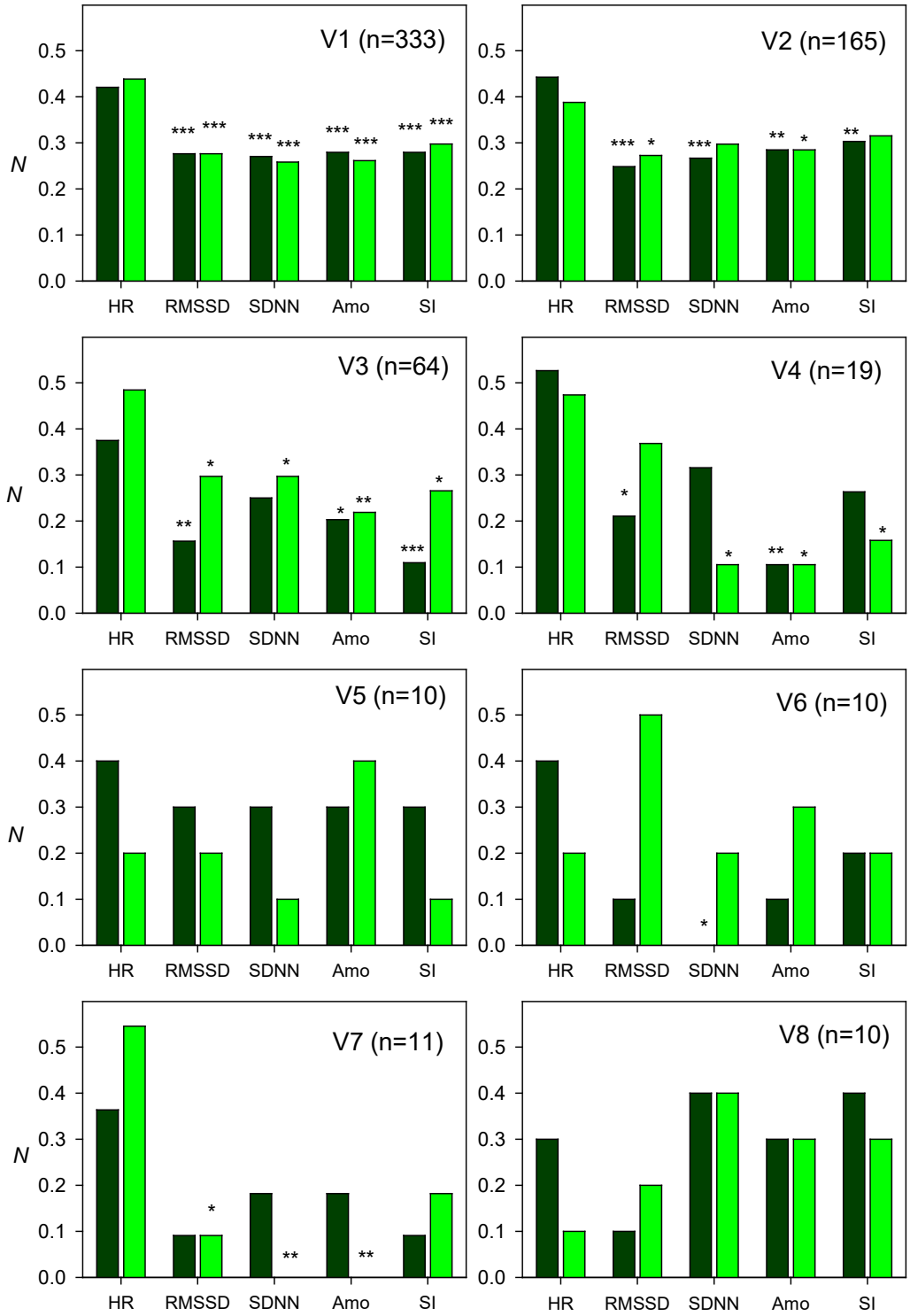

Рис. 5. Выборочные распределения частоты случаев синхронизации частоты сердечных сокращений (HR) и показателей вариабельности сердечного ритма с компонентами геомагнитного поля для волонтёров 1-й группы согласно методу сравнения вейвлет-спектров. Обозначения как на рис. 3.

Fig. 5. Sample distributions of the frequency of synchronisation of HR and HRV indices with the components of GMF for Group 1 volunteers according to the wavelet spectra comparison method. The designations are as in Fig. 3.

как при продольном дизайне эксперимента (то есть многократных измерениях каждого из восьми волонтёров), так и при поперечном дизайне (то есть выборке однократных измерений по группе из 39 волонтёров). Также в некоторых случаях наблюдается тенденция постепенного снижения частоты встречаемости эффекта синхронизации в ряду параметров RMSSD–SDNN–AMo–SI.

Тот факт, что эффект синхронизации с каждой из компонент ГМП устойчиво обнаруживается на разных выборках примерно в 35–40% экспериментов, приводит

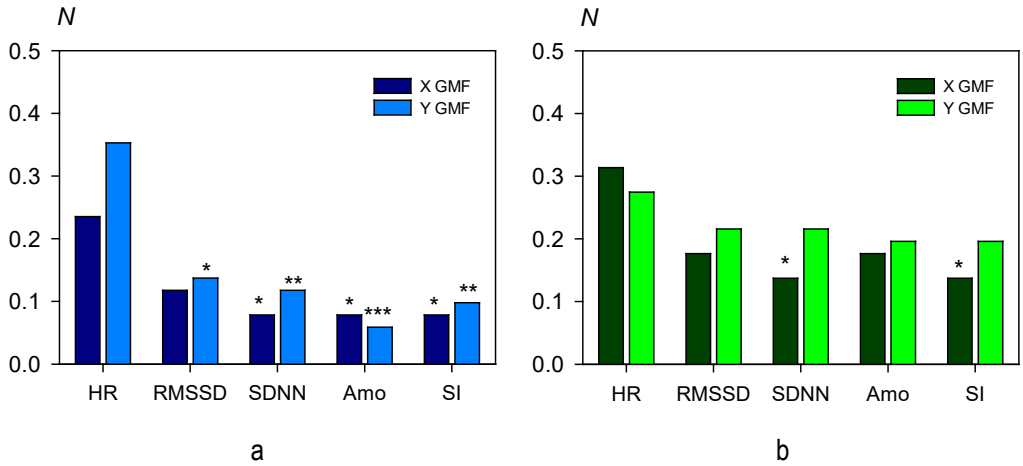

Рис. 6. Выборочные распределения частоты случаев синхронизации частоты сердечных сокращений (HR) и показателей вариабельности сердечного ритма с компонентами геомагнитного поля для волонтёров 2-й группы: a — кросскорреляционный метод анализа; b — метод сравнения вейвлет-спектров временных рядов. Обозначения как на рис 3.

Fig. 6. Sample distributions of the frequency of cases of synchronisation of HR and HRV indices with GMF components for volunteers of Group 2: a — cross-correlation method of analysis was used; b — the method of comparing wavelet spectra of time series was used. The designations are as in Fig. 3.

к выводу, что, с одной стороны, наблюдаемая зависимость между временны́ми рядами ЧСС и вектором ГМП не является случайной и эффект биогеофизической синхронизации действительно существует. С другой стороны, построенная на настоящий момент феноменологическая картина эффекта либо не полна и не учитывает какие-то важные моменты, либо включает посторонние элементы, зашумляющие эффект (либо и то, и другое). И дальнейшая задача заключается в постепенном уточнении существующей картины для более точного описания эффекта с целью его воспроизведения в будущем в лабораторных условиях и для контролируемого изучения. Причём можно обозначить три основных направления поиска: изучение особенностей динамики процессов регуляции сердечного ритма, анализ особенностей спектра вариаций ГМП и уточнение частотно-временных параметров алгоритма анализа.

Представленная работа посвящена первому из перечисленных направлений и выполнена на основе рабочей гипотезы о существовании некоторого ритмического процесса в организме (процесса-посредника, возможные примеры которого обсуждаются ниже), который, с одной стороны, чувствителен к вариациям ГМП, с другой — включён в систему регуляции сердечного ритма [25]. (Естественно, таких процессов может быть несколько, и они могут быть включены как последовательно, так и параллельно). В рамках этой рабочей схемы процесса синхронизации неустойчивость регистрации эффекта может быть обусловлена влиянием процессов внутренней регуляции организма: чем больше в каждый текущий момент вклад этого магниточувствительного процесса-посредника в регуляцию динамики ЧСС, тем сильнее наблюдаемый нами эффект синхронизации ЧСС и вектора ГМП. При этом временны́е интервалы синхронизации/отсутствия синхронизации могут чередоваться как квазипериодически, так и почти случайно и иметь длительность от минут до часов и суток или включать циркадианную составляющую, или зависеть от наличия некоего третьего фактора. Выяснение этих особенностей эффекта является предметом дальнейшего исследования.

При сравнении полученных данных с более ранними результатами других авторов необходимо принимать во внимание, что в подавляющем большинстве работ по исследованию чувствительности ВНС к геомагнитным вариациям [1, 8, 12, 13] авторы использовали традиционные 5-минутные записи ВСР, сделанные обычно 1 раз в сутки, по которым затем вычисляли значения ЧСС и показателей ВСР (одно значение каждого показателя за эксперимент) и сопоставляли их с уровнем возмущённости ГМП (индексы Кр, Ар, интегральная интенсивность первого резонанса Шумана и др.). Поскольку измерения проводили раз в сутки, фактически данные оценки значений ВСР соответствовали суточному масштабу дискретизации данных. При этом измеряемым параметром была величина изменения (сдвига) среднего значения параметров ВСР при изменении уровня ГМА. В нашем случае, во-первых, интервал времени вычисления параметров ВСР и значения компонент ГМП составлял 1 мин и производился 60–120 раз во время каждого эксперимента, во-вторых, изучаемый эффект заключался в подстройке частоты колебаний, а не в смещении среднего значения ФП.

Таким образом, в наших экспериментах были изучены намного более высокочастотные (ультрадианные) и меньшие по амплитуде проявления реакции ВНС на вариации ГМП, чем в более ранних исследованиях других авторов. Можно предположить, исходя из характерного времени формирования ответа в каждом из этих случаев, что эффекты, наблюдаемые в минутном разрешении данных, представляют собой один из ранних этапов формирования такой реакции. В то же время эффекты значимого сдвига показателей ВСР во время геомагнитных

бурь и возмущений, наблюдаемые в суточном масштабе и свидетельствующие о формировании реакции специфического и неспецифического стресса, являются более крупномасштабной и долгосрочной, уже системной формой ответа организма на изменения ГМП. Поэтому непосредственное сравнение любых результатов необходимо проводить только с результатами, полученными при той же (или сравнимой) частоте дискретизации данных.

Васин и соавт. [15] провели эксперименты по влиянию МП миллигерцового диапазона (f_1=1,67 мГц и f_2=1,11 мГц) на здоровых волонтёров в покое, с экспозицией в МП в течение одного часа и вычислением параметров ВСР по последовательным 5-минутным интервалам времени. Оценивали изменения различных показателей ВСР, во-первых, по критерию сдвига средних значений в результате действия МП, во-вторых — по изменению спектральной плотности мощности каждого из показателей ВСР в диапазоне частот 0,833–3,333 мГц (5–20 мин), близком к пульсациям Pc5–Pc6.

Анализ изменения средних значений показателей ВСР показал, что в результате экспозиции в наибольшей степени изменяются pNN50, SDNN, LF/HF и VLF. Таким образом, приложенное искусственное МП с частотно-амплитудными параметрами, близкими к вариациям ГМП, приводит к статистически значимому сдвигу средних значений, как во время магнитных бурь.

Однако для нас в данном эксперименте более интересными являются результаты оценки изменения спектральной плотности мощности различных показателей ВСР, поскольку они напрямую соотносятся с нашими результатами. Во-первых, оцениваемый спектральный диапазон 5–20 мин совпадает с частью диапазона, в котором мы оценивали совпадение спектров ЧСС и вариаций ГМП (3–40 мин). Во-вторых, одна из частот прилагаемого МП f_1=1,67 мГц соответствует обнаруженному нами ранее периоду 10 мин [25, 32], вблизи которого эффект синхронизации ЧСС с минутными вариациями ГМП выражен наиболее отчётливо. И, наконец, в работе [30] авторы обнаружили возрастание мощности спектра только для двух анализируемых показателей ВСР, собственно meanNN (что эквивалентно ЧСС) и показателя LF/HF, в то время как для RMSSD и SDNN наблюдалось даже небольшое снижение, а показатели AMo и SI в анализ не входили. Поскольку спектральные показатели ВСР в нашем исследовании пока не анализировались, то полученные выводы полностью согласуются с результатами работы [15]: из временных параметров ВСР в диапазоне колебаний 5–20 мин увеличения спектральной мощности наблюдаются для показателя meanNN (ЧСС) по сравнению с показателями RMSSD и SDNN.

В данной работе мы не анализировали спектральные показатели ВСР и частоту их синхронизации с ритмикой ГМП, это предмет будущих исследований. Однако ранее была выполнена серия экспериментов по регистрации ВСР длительностью 30 мин в группах здоровых волонтёров и лиц с нарушенным сосудистым тонусом (то есть с повышенным или пониженным АД), с последующей оценкой частоты встречаемости эффекта синхронизации в этих группах по различным показателям ВСР. Было установлено, что в группе лиц с нарушениями регуляции АД частота встречаемости значимой корреляционной связи компонентов ГМП с показателями ВСР была больше, чем у здоровых. Наиболее сильно данное различие проявлялось с показателями ВСР, характеризующими вагусную активность (RMSSD, HF) [31]. Аналогичный вывод получался, если в группе лиц с нарушениями регуляции АД рассматривать только подгруппу лиц с артериальной гипертензией: синхронизация вариаций компонент ГМП с колебаниями показателей ВСР в этой группе была выше, чем у здоровых испытуемых, особенно по показателям HF (60% против 8,7%, p <0,05) и RMSSD (50% против 13%, p <0,05) [33]. В то же время по параметру LF, отражающему барорефлекторную активность, у лиц с нормальным АД частота встречаемости синхронизации вариаций компонент ГМП была значимо выше, чем у лиц с артериальной гипертензией [27]. Таким образом, частота встречаемости синхронизации параметров ВСР с вариациями ГМП у здоровых лиц, полученная нами в более ранних работах, сходна по величине с полученной в данном исследовании: до 20% с некоторым приоритетом в отношении параметра RMSSD. В данном случае определённая синхронизация показателя LF, отражающего барорефлекс, с вариациями компонент ГМП рассматривалась как адаптивная, на фоне которой другие показатели ВСР сохраняли в большей степени свою автономию от колебаний ГМП у лиц с нормальным сосудистым тонусом, чем у лиц с его нарушениями (артериальная гипертензия).

Нужно отметить, что мощность LF отражает активность барорефлекса через воздействие барорецепторов, которые имеют ионные каналы с пьезоэлектрическими свойствами (в частности Piezo2), а также с вагальными эффектами [34, 35]. Некоторые исследователи называют барорецепторы аорты барорецепторами нижнего давления. При этом импульсы механического растяжения передаются в правое предсердие, где запускается механизм сердечных сокращений [36]. Теоретически колебания активности барорецепторов могут быть модулируемы вариациями ГМП через модуляции осцилляций подпорогового мембранного потенциала (subthreshold membrane potential oscillations), которые в свою очередь влияют на функцию синусового узла, определяя ЧСС.

Осцилляции подпорогового мембранного потенциала имеют свою ритмичную природу, при определённых условиях (воспаление, нарушение метаболизма) ритмика пачечной активности этих колебаний меняется и возникает потенциал действия. Найдена такая внутренняя ритмичность в клетках головного мозга (циркадные нейроны супрахиазматического ядра, ретротрапецевидного ядра ствола головного мозга) [37]. Такая колебательная активность опосредована через ионный канал с транзиторным

рецепторным потенциалом (transient receptor potential cation channel subfamily M member 4 — TRPM4). TRPM4 участвует в подпороговой осцилляции, которая поддерживает пейсмекерную активацию нейронов ретротрапецевидного ядра ствола головного мозга, необходимую для базального, стимулированного CO_2 и зависящую от состояния дыхания. Также этот рецептор есть в кардиомиоцитах и очень важен в плане функционирования биоэлектрогенеза в миокарде [38]. Таким образом, предполагается эффект резонанса вариаций ГМП и колебаний подпорогового мембранного потенциала электровозбудимых структур опосредованно через изменение работы ионных каналов через рецептор TRPM4 напрямую в миокарде. При этом активность ВНС как передаточного звена при возбуждении синусового узла предсердий при вариациях ГМП может быть минимальной. Также возможна трансляция возбуждения на сердечный ритм опять же через изменение активности рецептора TRPM4, но в головном мозге. Нервные окончания с барорецепторов (артериальные, кардиопульмональные) также суммируются в составе блуждающего и языкоглоточного нервов, транслируя нервную передачу в центры ВНС на уровне ствола головного мозга. Тогда можно ожидать и более длительные периоды колебаний как ЧСС, так и параметров ВСР.

Также перспективно рассмотрение в качестве механизма прямого влияния вариаций ГМП на биоэлектрогенез в миокарде активации эфаптической (несинаптической) трансмиссии сигналов между электровозбудимыми структурами в миокарде. Такой механизм показан в неокортексе млекопитающих. Есть предположение, что биомагнитные поля астроглии, связанные с кратковременными изменениями концентрации Ca^{2+}, могут участвовать в эфаптической связи нейронов посредством прямой магнитной модуляции межклеточных локальных полевых потенциалов [39]. Эфаптическая передача энергии импульса в клетках миокарда *in vitro* была показана ещё в 80-х гг. XX в. [40] и находится в поле зрения исследователей и в настоящее время. Полагают, что электрический импульс может транслироваться в соседние кардиомиоциты не только через нексусы (щелевые контакты между сарколеммами), но и через специальные пространства рядом с этими щелевыми контактами — перинексус [41]. И именно эти биоэлектрические процессы, происходящие в перинексусе, являются основой эфаптической передачи электрического импульса между кардиомиоцитами в миокарде. С учётом того что перинексусные пространства в миокарде достаточно удалены от регуляторных симпатических и вагусных влияний, реакция ЧСС на внешние электромагнитные влияния вполне может обеспечиваться эфаптическим механизмом, в «обход» автономных нервных влияний на ритм сердца, который может быть реализован в определённых частотных диапазонах.

Таким образом, полученные нами результаты могут быть интерпретированы следующим образом. Возможно, использованные временны́е параметры ВСР, рассчитанные за интервалы времени по 1 мин, имеют своё ограниченное значение для оценки состояния ВНС. Автономные нервные (вегетативные) эффекты регуляции сердечного ритма могут быть выявляемы более чувствительными способами регистрации, в частности, методами оценки ритмичности секреции катехоламинов и ацетилхолина в синаптическую щель или в общую циркуляцию крови. И эта ритмичность секреции может оказывать влияние на колебания ЧСС, синхронизированные в свою очередь с ГМП. Однако такие измерения методически сложно выполнить в эксперименте с участием людей.

В то же время очень перспективным выглядит продолжение анализа полученных данных в плане оценки эффекта синхронизации для спектральных показателей ВСР (HF, LF, VLF, LF/HF), в том числе с учётом синхронизации вариаций компонент ГМП с 2- или 3-минутными записями ВСР, которые были бы более корректными для анализа скользящего среднего спектральных показателей ВСР [27]. Но такой анализ требует значительной доработки как алгоритма преобразования рядов RR-интервалов в ряды значений спектральных показателей ВСР, так и (вполне возможно) дополнительной верификации параметров алгоритма оценки сходства с учётом особенностей новых временны́х рядов.

Ограничение исследования заключалось в анализе только временны́х показателей ВСР, потому что использование для анализа спектральных низкочастотных и сверхнизкочастотных параметров ВСР (Low Frequency, Very Low Frequency) требует специальной математической подготовки кардиоритмограмм.

Именно поэтому направления будущих возможных исследований можно сформулировать следующим образом.

1. Необходимо проанализировать возможное проявление эффекта биогеосинхронизации для спектральных показателей ВСР (сравнить вероятность совпадения их спектров со спектрами вектора ГМП).

2. Исследовать возможные эффекты перекачки спектральной мощности между различными частотными диапазонами ВСР в зависимости от геомагнитных условий.

3. Разработать методику и провести эксперименты по регистрации временны́х рядов значений биохимических показателей, характеризующих баланс ВНС.

4. Провести анализ зависимости возникновения эффекта биогеосинхронизации от особенностей геомагнитной обстановки.

На основании проведённых исследований усовершенствовать методики индивидуальной магниточувствительности сердечно-сосудистой системы человека с учётом уровня здоровья (наличие или отсутствие артериальной гипертензии), а также более точно разработать систему биотропных периодов колебаний как ЧСС, так и связанных с ней физиологических параметров для моделирования процессов регуляции сердечного ритма в условиях колебаний внешних электромагнитных полей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный нами метод исследования особенностей синхронизации сердечного ритма с вариациями ГМП в миллигерцовом диапазоне частот является эффективным инструментом для тестирования различных гипотез в рамках фундаментальной задачи выявления физиологических путей развития реакции организма на действие внешних факторов низкой интенсивности.

Рассмотренные временны́е параметры ВСР как отражение вегетативной регуляции сердечного ритма являются менее чувствительными к статистическому анализу взаимосвязей с параметрами ГМП по сравнению с ЧСС. Тем не менее роль ВНС как передаточного звена во влиянии ГМП на колебания ЧСС возможна через ритмичность активности артериальных и кардиопульмональных барорецепторов, а также через ритмичность секреции катехоламинов и ацетилхолина в синаптической щели и общей циркуляции крови, что требует дальнейших экспериментальных подтверждений.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Т.А. Зенченко — разработка концепции исследования, анализ данных, подготовка и написание текста статьи; Л.В. Поскотинова — разработка концепции исследования, сбор данных, редактирование статьи; Н.И. Хорсева — сбор данных, редактирование статьи; Т.К. Бреус — обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста, редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведения исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Этическая экспертиза. Исследование одобрено комитетом по биоэтике ИТЭБ РАН (протокол № 06/2012 от 01.06.2012).

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИТЭБ РАН № 075-00223-25-02, государственного задания ИКИ РАН, тема «Плазма», государственного задания ИБХФ РАН (44.1. гос. № темы 0084-2019-004) и государственного задания ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (№ FUUW-2025-0032).

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

Благодарности. Результаты, представленные в этой статье, получены с использованием геофизических данных, собранных обсерваториями Nurmijarvi и Borok. Авторы благодарят Finnish Meteorological Institute и геофизическую обсерваторию Борок за предоставленные данные и их деятельность в рамках проекта INTERMAGNET по распространению высоких стандартов геофизических наблюдений. Также авторы выражают благодарность М.Е. Диатроптову, А.А. Станкевич и А.Э. Елфимовой за помощь в сборе данных.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. T.A. Zenchenko — development of the research concept, data analysis, preparation and writing of the article; L.V. Poskotinova — development of the research concept, data collection, editing of the article; N.I. Khorseva — data collection, editing of the article; T.K. Breus — literature review, collection and analysis of literary sources, writing of the text and editing of the article. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors have made a significant contribution to the development of the concept, research and preparation of the article, read and approved the final version before publication).

Ethical expertise. The study was approved by the Bioethics Committee of the ITEB RAS (Protocol No. 06/2012 dated 06/01/2012).

Consent for publication. All study participants voluntarily signed an informed consent form before being included in the study.

Funding sources. The work was carried out within the framework of the State Assignment of ITEB RAS No. 075-00223-25-02, State Assignment of IKI RAS, topic "Plasma", State Assignment of IBCP RAS (44.1. state topic number 0084-2019-004) and State Assignment of FGBUN FITC RAS Ural Branch No. FUUW-2025-0032.

Disclosure of interests. The authors have no relationships, activities or interests for the last three years related with for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality. In creating this work, the authors did not use previously published information (text, illustrations, data).

Data availability statement. The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, and no new data was collected or created.

Generative AI. Generative AI technologies were not used for this article creation.

Provenance and peer-review. This paper was submitted to the journal on an unsolicited basis and reviewed according to the usual procedure. Two external reviewers, a member of the editorial board, and the scientific editor of the publication participated in the review.

Acknowledgments. The results presented in this paper were obtained using geophysical data collected by Nurmijarvi and Borok observatories. The authors thank the Finnish Meteorological Institute and Borok Geophysical Observatory for providing the data and for their work within the INTERMAGNET project to disseminate high standards of geophysical observations. The authors also thank M.E. Diatroptov, A.A. Stankevich and A.E. Elfimova for their assistance in data collection.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Cornélissen G, Halberg F, Breus T, et al. Non-photic solar associations of heart rate variability and myocardial infarction. *J Atmos Sol Terr Phys.* 2002;64(s 5–6):707–720. doi: 10.1016/S1364-6826(02)00032-9
2. Ozheredov VA, Breus TK, Gurfinkel YI, et al. Influence of some weather factors and geomagnetic activity on the development of severe cardiological pathologies. *Biophysics.* 2010;55(1):110–119. EDN: MVILUR
3. Mavromichalaki H, Papailiou M, Dimitrova S, et al. Space weather hazards and their impact on human cardio-health state parameters on Earth. *Nat Hazards.* 2012;64:1447–1459. doi: 10.1007/s11069-012-0306-2

4. Vaičiulis V, Venclovienė J, Tamošiūnas A, et al. Associations between space weather events and the incidence of acute myocardial infarction and deaths from ischemic heart disease. *Atmosphere.* 2021;12(3):306. doi: 10.3390/atmos12030306
5. Podolská K. Changes of circulatory and nervous diseases mortality patterns during periods of exceptional solar events. *Atmosphere.* 2021;12(2):203. doi: 10.3390/atmos12020203
6. Rapoport SI, Bolshakova TD, Malinovskaya NK, et al. The magnetic storm as a stress factor. *Biofizika.* 1998;43(4):638–639. EDN: MPAGOR
7. Khorseva NI. Possibility of using the psychophysiogical indices for the evaluation of the influence of cosmophysical factors (review). *Geophysical Processes and Biosphere.* 2013;12(2):34–56. EDN: RAGHTZ
8. Gurfinkel YI, Ozheredov VA, Breus TK, Sasonko ML. The effects of space and terrestrial weather factors on arterial stiffness and endothelial function in humans. *Biophysics*. 2018;63(2):299–306. EDN: YRYXAH
9. Dimitrova S, Stoilova I, Cholakov I. Influence of local geomagnetic storms on arterial blood pressure. *Bioelectromagnetics.* 2004;25(6):408–414. doi: 10.1002/bem.20009
10. Ozheredov VA, Chibisov SM, Blagonravov ML, 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(5):921–929. doi: 10.1007/s00484-016-1272-2
11. Zenchenko TA, Poskotinova LV, Rekhtina AG, Zaslavskaya RM. Relation between microcirculation parameters and Pc3 geomagnetic pulsations. *Biophysics*. 2010;55(4):646–651. doi: 10.1134/S000635091004024X EDN: NYMXXT
12. Otsuka K, Yamanaka T, Cornelissen G, et al. Altered chronome of heart rate variability during span of high magnetic activity. *Scripta medica (Brno)*. 2000;73(2):111–116.
13. Otsuka K, Cornélissen G, Weydahl A, et al. Geomagnetic disturbance associated with decrease in heart rate variability in a subarctic area. *Biomed Pharmacother.* 2001;55(Suppl 1):51s–56s. doi: 10.1016/s0753-3322(01)90005-8
14. Alabdulgade A, Maccraty R, Atkinson M, et al. Human heart rhythm sensitivity to earth local magnetic field fluctuations. *J. Vibroeng.* 2015;17(6):3271–3278.
15. Vasin AL, Shafirkin AV, Gurfinkel YuI. Effect of artificial alternating geomagnetic field in the millihertz range on the heart rate variability indices. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2019;53(6):62–69. doi: 10.21687/0233-528X-2019-53-6-62-69 EDN: RVCQVD
16. Gmitrov J, Ohkubo C. Geomagnetic field decreases cardiovascular variability. *Electro Magnetobiol.* 1999;18:291–303. doi: 10.3109/15368379909022585
17. Lednev VV, Belova NA, Ermakov AM, et al. Modulation of cardiac rhythm in the humans exposed to extremely weak alternating magnetic fields. *Biophysics.* 2008;53(6):648–654. doi: 10.1134/S0006350908060328 EDN: LLKJWB
18. Pobachenko SV, Kolesnik AG, Borodin AS, Kalyuzhin VV. The contingency of parameters of human encephalograms and Schumann resonance electromagnetic fields revealed in monitoring studies. *Biophysics*. 2006;51(3):480–483. doi: 10.1134/S0006350906030225 EDN: LJPAJZ
19. Timofejeva I, McCraty R, Atkinson M, et al. Identification of a group's physiological synchronization with earth's magnetic field. *Int J Environ Res Public Health.* 2017;14(9):998. doi: 10.3390/ijerph14090998
20. Maksimov AL, Volkov AI, Savintseva AA, et al. About resonance interaction of Schumann's biospherical frequencies and human brain rhythms. In: *Abstracts of the VI International Congress "Weak and ultra-weak fields and radiations in biology and medicine"*. St. Petersburg; 2012. P. 168. (In Russ.) URL: www.biophys.ru/archive/congress2012/proc-p168.pdf
21. Caswell JM, Singh M, Persinger MA. Simulated sudden increase in geomagnetic activity and its effect on heart rate variability: experimental verification of correlation studies. *Life Sci Space Res*. 2016;10:47–52. doi: 10.1016/j.lssr.2016.08.001
22. Elhalel G, Price C, Fixler D, Shainberg A. Cardioprotection from stress conditions by weak magnetic fields in the Schumann resonance band. *Sci Rep*. 2019;9(1):1645. doi: 10.1038/s41598-018-36341-z
23. Gurfinkel YuI, Vasin AL, Pishchalnikov RYu, et al. Geomagnetic storm under laboratory conditions: randomized experiment. *Int J Biometeorol.* 2018;62(4):501–512. doi: 10.1007/s00484-017-1460-8
24. Zenchenko TA, Medvedeva AA, Khorseva NI, Breus TK. Synchronization of human heart-rate indicators and geomagnetic field variations in the frequency range of 0.5–3.0 mHz. *Izv. Atmos. Ocean. Phys.* 2014;50:736–744. doi: 10.1134/S0001433814040094
25. Zenchenko TA, Khorseva NI, Breus TK. Long-term study of the synchronization effect between geomagnetic field variations and minute-scale heart-rate oscillations in healthy people. *Atmosphere,* 2024;15(1):134. doi: 10.3390/atmos15010134
26. Zenchenko TA, Jordanova M, Poskotinova LV, et al. Synchronization between human heart rate dynamics and Pc5 geomagnetic pulsations at different latitudes. *Biophysics*, 2014;59:965–972. doi: 10.1134/S0006350914060256
27. Poskotinova L, Krivonogova E, Demin D, Zenchenko T. Differences in the sensitivity of the baroreflex of heart rate regulation to local geomagnetic field variations in normotensive and hypertensive humans. *Life,* 2022;12(7):1102. doi: 10.3390/life12071102
28. Lukyanova SN. Neuroeffects of microwave EMF of non-thermal intensity and short exposure. *Radiation biology. Radioecology*. 2024;64(3):244–256. doi: 10.31857/S0869803124030026 EDN: MBQOJM
29. Davis GE Jr, Lowell WE. Chaotic solar cycles modulate the incidence and severity of mental illness. *Med. Hypotheses*, 2004;62(2):207-214. doi: 10.1016/j.mehy.2003.11.006
30. Baevsky RM, Ivanov GG, Chireikin LV, et al. Analysis of heart rate variability using various electrographic systems (methodological recommendations). *Journal of Arrhythmology*. 2002;(24):65–87. (In Russ.) EDN: HSPLXF
31. Poskotinova LV, Krivonogova EV, Zenchenko TA, Demin DB. Features of synchronization of heart rate variability and local variations of the geomagnetic field component's in individuals with different blood pressure levels. In: Collection of scientific papers of the VI Congress of Biophysicists of Russia. Sochi; 2019. P. 364. (In Russ.) EDN: FOKRDR
32. Zenchenko TA, Khorseva NI, Stankevich AA. The effect of synchronizing the human heart rhythm with geomagnetic field variations: are there distinguished frequencies? *Biofizika*. 2024;69(4):915–926. doi: 10.31857/S0006302924040221 EDN: NEXGFJ
33. Poskotinova LV, Demin DB, Krivonogova EV, et al. Neurophysiological mechanisms of adaptation of Arctic residents with socially significant neurological and cardiovascular disorders and methods for correcting maladaptive disorders. FGBUN FITSKIA Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. No 122011900077-8. Research report. 2021. EDN: ZCSLCD
34. Sonkodi B. LF power of HRV could be the Piezo2 activity level in baroreceptors with some Piezo1 residual activity contribution. *Int J Mol Sci.* 2023;24(8):7038. doi: 10.3390/ijms24087038
35. Zhou Z, Martinac B. Mechanisms of PIEZO channel inactivation. *Int J Mol Sci.* 2023;24(18):14113. doi: 10.3390/ijms241814113
36. Mamberger KK, Makedonsky DF, Rudenko MYu, Rudenko SM. Functional interconnection between sinoatrial node of right atrium and low-pressure baroreceptors in aorta. *Izvestiya sfedu. Engineering sciences*. 2009;(7):23–29 EDN: KVBCKP
37. Li K, Shi Y, Gonye EC, Bayliss DA. TRPM4 contributes to subthreshold membrane potential oscillations in multiple mouse pacemaker neurons. *eNeuro.* 2021;8(6):ENEURO.0212-21.2021. doi: 10.1523/ENEURO.0212-21.2021
38. Hu Y, Cang J, Hiraishi K, et al. The Role of TRPM4 in cardiac electrophysiology and arrhythmogenesis. *Int J Mol Sci.* 2023;24(14):11798. doi: 10.3390/ijms241411798
39. Martinez-Banaclocha M. Ephaptic coupling of cortical neurons: possible contribution of astroglial magnetic fields? *Neuroscience*. 2018;370:37–45. doi: 10.1016/j.neuroscience.2017.07.072
40. Suenson M. Ephaptic impulse transmission between ventricular myocardial cells in vitro. Acta Physiol Scand. 1984;120(3):445–455. doi: 10.1111/j.1748-1716.1984.tb07405.x

ОБ АВТОРАХ

***Зенченко Татьяна Александровна,** д-р биол. наук, канд. физ-мат. наук;
адрес: Россия, 142290, Московская обл., Пущино, ул. Институтская, д. 3;
ORCID: 0000-0002-0520-2029;
eLibrary SPIN: 8974-6685;
e-mail: zench@mail.ru

Поскотинова Лилия Владимировна, д-р биол. наук, канд. мед. наук, доцент;
ORCID: 0000-0002-7537-0837;
eLibrary SPIN: 3148-6180;
e-mail: liliya200572@mail.ru

Хорсева Наталия Игоревна, канд. биол. наук;
ORCID: 0000-0002-3444-0050;
e-mail: sheridan1957@ mail.ru

Бреус Тамара Константиновна, д-р физ.-мат. наук;
ORCID: 0000-0003-4057-0844;
eLibrary SPIN: 1267-8561;
e-mail: breus36@mail.ru

AUTHORS' INFO

***Tatiana A. Zenchenko,** Dr. Sci. (Biology), Cand. Sci. (Physics and Mathematics);
address: 3 Institutskaya st, Pushchino, Moscow region, Russia, 142290;
ORCID: 0000-0002-0520-2029;
eLibrary SPIN: 8974-6685;
e-mail: zench@mail.ru

Liliya V. Poskotinova, Dr. Sci. (Biology), MD, Cand. Sci. (Medicine), Assistant Professor;
ORCID: 0000-0002-7537-0837;
eLibrary SPIN: 3148-6180;
e-mail: liliya200572@mail.ru

Nataliya I. Khorseva, Cand. Sci. (Biology);
ORCID: 0000-0002-3444-0050;
e-mail: sheridan1957@ mail.ru

Tamara K. Breus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics);
ORCID: 0000-0003-4057-0844;
eLibrary SPIN: 1267-8561;
e-mail: breus36@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author