

## ЭФФЕКТ СИНХРОНИЗАЦИИ СЕРДЕЧНОГО РИТМА ЧЕЛОВЕКА С ВАРИАЦИЯМИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ: СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ВЫДЕЛЕННЫЕ ЧАСТОТЫ?

© 2024 г. Т.А. Зенченко\*, \*\*, #, Н.И. Хорсева\*\*\*, А.А. Станкевич\*

\*Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН,  
Институтская ул., 3, Пущино Московской области, 142290, Россия

\*\*Институт космических исследований РАН, Профсоюзная ул., 84/32, Москва, 117997, Россия

\*\*\*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, ул. Косыгина, 4, Москва, 119334, Россия

#E-mail: zench@mail.ru

Поступила в редакцию 08.02.2024 г.

После доработки 15.06.2024 г.

Принята к публикации 19.06.2024 г.

Продолжено исследование феноменологии эффекта синхронизации колебаний сердечного ритма человека в покое с вариациями геомагнитного поля в диапазоне периодов 3–40 мин. В течение 2012–2023 гг. проведено 508 экспериментов (длительностью 100–120 мин каждый) по мониторингу минутных показателей сердечного ритма у трех практически здоровых женщин (55, 45 и 30 лет). Индивидуальные экспериментальные выборки составили 328, 113 и 67 записей соответственно. Показано, что для каждого из трех волонтеров примерно в 60% экспериментов вейвлет-спектр значений сердечного ритма оказывается очень близким со спектром синхронных вариаций хотя бы одной из горизонтальных компонент геомагнитного поля (X или Y). Также внутри исследованного частотного диапазона 3–40 мин выявлено три субдиапазона, в которых степень синхронности возникновения колебаний является максимальной: 3.5 мин, 10–12 мин и 33–36 мин. Можно сделать вывод, что, по-видимому, эффект биогосинхронизации реализуется не равномерно по всему диапазону 3–40 мин, а преимущественно в данных субдиапазонах.

*Ключевые слова:* солнечно-биосферные связи, биоритмология, синхронизация ритмов, вариации геомагнитного поля, магниточувствительность, сердечный ритм.

DOI: 10.31857/S0006302924040221, EDN: NEXGFJ

Система «Солнце–геосфера–биосфера» является очень сложным для изучения объектом в силу многочисленности и нелинейности существующих в ней внутренних связей. Даже изучение какой-то отдельной подсистемы (например, «солнечная активность – климат» [1], «шумановские резонансы – грозы – глобальные вариации температуры» [2], «электромагнитные поля атмосферы – сейсмическая активность» [3] и др. требовали соединенных усилий больших групп исследователей различных специальностей.

Столь же комплексной и междисциплинарной научной проблемой является система связей «геосфера–биосфера», поскольку практически все перечисленные выше физические факторы не только взаимосвязаны, но и влияют тем или

иным образом на биологические объекты (в частности, и на человека). В одних случаях это влияние носит угрожающий характер, как в случае волн жары или холода ([4–6] и списки литературы в этих работах) или глобальных возмущений геомагнитного поля (ГМП) ([7–11] и списки литературы в этих работах). В других случаях влияние внешних факторов проявляется как изменение функционального состояния человека без срыва организма в заболевание или внезапную смерть [12]. Имеются свидетельства о возможной биотропной роли инфразвука [13, 14], шумановских резонансов [15–17], электромагнитных полей крайне низкой частоты [18, 19], вторичной компоненты космических лучей, галактических и солнечных [20–23], динамики глобальных течений океана [24] и др.

Множество уже выявленных геосферно-биосферных связей различного временного масштаба от минут до десятилетий является существенно

*Сокращения:* ГМП – геомагнитное поле, HR – частота сердечных сокращений (Heart Rate), ЭКГ – электрокардиограмма.

неполным, что не позволяет в настоящий момент построить более-менее рабочую феноменологическую картину. В то же время изучение данной системы является очень актуальной задачей не только с точки зрения углубления фундаментальных представлений об окружающей среде, но и для решения прикладных задач защиты здоровья человека: при работе в экстремальных условиях высоких широт или высокогорья, для оценки состояния операторов процессов непрерывного цикла, для защиты космонавтов при межпланетных перелетах, для профилактики заболеваемости и т.д.

Существует мнение, что при решении данной научной проблемы единственно надежными и информативными являются результаты лабораторных экспериментов, поскольку только в них можно контролируемо изучать возможные биохимические и биофизические механизмы, лежащие в основе формирования биологического ответа на действие природных факторов низкой интенсивности. Такой подход действительно позволил экспериментально доказать принципиальную возможность влияния крайне слабых магнитных полей, близких к природным, на живые организмы [25–29], отдельные органы и биологические ткани [30–32] или даже биомолекулы [33]. С другой стороны, достигнуть в лабораторном эксперименте точного воспроизведения наблюдаемых гелиобиологических эффектов пока не удается, возможно еще и потому, что, как сказано выше, мы пока не имеем четкого и экспериментально обоснованного представления о том, какое именно сочетание внешних факторов и с какими характеристиками обеспечивает наблюдаемые в природе эффекты.

Поэтому проведение длительных натурных наблюдений с последующим анализом возможного вклада различных внешних факторов, от уровня солнечной активности до интенсивности нейтронных потоков в приземном слое, остается важным методом изучения солнечно-биосферных связей.

Одним из традиционных подходов в этом направлении является анализ сходства частотно-амплитудных параметров биологической и гелиогеофизической ритмики на разных временных масштабах, от десятилетий до суток [8–10, 25, 26, 34–36]. Этот подход в свое время позволил выявить более сложные формы реакции биосферы на действие факторов космической погоды, чем простая формула «действие–эффект», а именно, амплитудную и частотную модуляцию ритмических биологических процессов гелио- и геофизическими ритмами, т.е. их синхронизацию.

В последние два десятилетия данный подход был применен в значительно более высокочастотном, а именно, в герцовом диапазоне, включающем частоты первых мод шумановских резонансов (8–14 Гц) и геомагнитных пульсаций РС1 (Pulsation Continuous, 0.5–2.0 Гц) [13, 15, 17, 37–41]. В частности, было обнаружено сопряжение активности мозговых процессов и интенсивности основной моды шумановского резонанса (8 Гц) [38, 41], а также колебаний параметров сердечного ритма у здоровых людей и частоты основной моды внешнего электромагнитного фона в диапазоне частот от 0.8 до 2.5 Гц [17]. Однако, к сожалению, эти исследования эффекта синхронизации в герцовом диапазоне не получили дальнейшего развития в плане детализации феноменологии эффекта: стабильности воспроизведения, возможной зависимости от времени суток, уровня геомагнитной активности, фазы солнечного цикла, анамнестических данных испытуемых, а также множества других параметров, о которых известно, что они влияют на степень выраженности гелиобиологических эффектов [21, 42–44].

Ранее нами было обнаружено [45], что при сопоставлении временных рядов значений частоты сердечных сокращений (Heart Rate, HR) и синхронных им рядов вариаций  $X$ - и  $Z$ -компонент вектора ГМП, примерно в 60% экспериментов наблюдается статистически значимая корреляция ( $p < 0.05$ ) между значениями биологического ряда и хотя бы одного из геофизических. Спектральный анализ данных рядов (Фурье, вейвлет, периодограммный) показывал, что спектры рядов HR различаются в разных экспериментах, однако в значительном числе случаев они оказываются очень близкими к спектрам синхронных им рядов вариаций вектора ГМП, причем не только по представленным основным частотам, но и по фазам колебаний.

Этот эффект наблюдался как в продольном эксперименте (серии из 30 последовательных экспериментов, проведенных на одном и том же волонтере в Москве (Россия)), так и в поперечном, т.е. при измерениях в группе из 27 здоровых волонтеров [45]. Он был обнаружен в условиях различных широт (Архангельск, Сыктывкар, Москва, Крым, София) [37, 46–48], а также в спокойных геомагнитных условиях и во время магнитных бурь различной интенсивности [47].

Таким образом, использованный нами метод полутора-двухчасового мониторинга электрокардиограммы (ЭКГ) человека в покое, неинвазивный и достаточно малозатратный, позволил проводить многократные измерения в различной геофизической обстановке у испытуемых различного возраста и состояния здоровья. За счет своей

**Таблица 1.** Возраст волонтеров и количество проведенных ими регистраций

Волонтер	Возраст	<i>N</i>	$Q_x > 0.4, \%$	$Q_y > 0.4, \%$	$Q_x$ или $Q_y > 0.4, \%$
А	55	328	41	43	58
В	45	113	42	38	59
С	30	67	33	45	57

простоты он позволяет набирать со временем практически неограниченные базы результатов измерений и на их основе постепенно выявлять различные феноменологические особенности эффекта биогосинхронизации в диапазоне периодов 3–40 мин, а также в будущем адаптировать его на другие диапазоны частот. С другой стороны, этот метод дает возможность проверки различных гипотез о возможной природе физиологического механизма (или механизмов), обуславливающего формирование реакции организма на действие ритмического внешнего фактора и подстройку частоты физиологического процесса (процессов) под внешний ритмодатчик.

Однако для дальнейшего поиска возможных биофизических механизмов необходимо было понять, проявляется ли наблюдаемый нами эффект биогосинхронизации в диапазоне 3–40 мин в равной мере на всех частотах данного диапазона или существуют выделенные частоты? Целью данной работы стало получение ответа на данный вопрос.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Чтобы максимально исключить погрешности, вносимые в эксперимент индивидуальной вариативностью эффекта магниточувствительности, отмечаемой многими авторами [17, 39, 40, 45], нами был выбран дизайн эксперимента с длительными многолетними наблюдениями трех практически здоровых женщин, постоянных жителей средних широт России. Измерения проводились всеми волонтерами на протяжении 2012–2023 гг. в разных географических локациях (Ленинградская обл., Московская обл., София (Болгария)).

Для регистрации ЭКГ-сигнала и его обработки использовали технические и программные средства, разработанные ООО «Медицинские компьютерные системы» (Зеленоград, Россия): выносной блок для регистрации ЭКГ-сигнала «KARDI-2» и пакет прикладных программ «CardiVar». Регистрацию ЭКГ-сигнала в четырех отведениях проводили в положении лежа, в состоянии бодрствования после 10-минутной адаптации. Полученные временные ряды RR-интервалов были преобразованы во временные

ряды ежеминутных значений HR длительностью  $D = 100–120$  точек (мин) каждый.

Возраст волонтеров на момент начала проведения наблюдений и количество регистраций, проведенных каждым из них, указаны в табл. 1. Согласно данным медицинских осмотров, волонтеры не имели хронических заболеваний, в том числе заболеваний сердечно-сосудистой системы, а также вредных привычек.

В качестве геофизических показателей были выбраны одномоментные 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 ( $55^{\circ}45' N / 37^{\circ}36' E$ ) были использованы данные геофизической станции Борок (BOXX,  $58.070 N, 38.230 E$ ), для Ленинградской области ( $59^{\circ}57' N / 30^{\circ}19' E$ ) – станции Нурмиярви (NUR,  $60.500 N, 24.600 E$ ), для Софии ( $42^{\circ}40' N / 23^{\circ}20' E$ ) – станции Панагюриште (PAG,  $42.50 N, 24.20 E$ ). Данные были получены из сети INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network, (<https://intermagnet.org/>)).

Нами были выбраны для сравнения значения вариаций именно горизонтальных компонент вектора ГМП, поскольку они слабо изменяются с увеличением расстояния до точки измерения, что было отдельно проверено [46]. 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 вариации и вертикальной компоненты вектора ГМП, и полного вектора [37, 45].

**Алгоритм анализа данных.** Расчеты проводили в программной среде MATLAB R2018 посредством встроенных функций и специально разработанных приложений.

Для исключения линейных трендов и низкочастотных колебаний каждый исследуемый отрезок ряда на предварительном этапе был отфильтрован посредством полосового фильтра с окном Блэкмана–Харриса и со значениями нижней и верхней частот среза соответственно  $F_1 = 0.02 - 0.08$  и  $F_2 = 0.9995$  от частоты Найквиста. Критерием выбора нижней границы фильтра  $F_1$  в каждом конкретном случае было требование, чтобы максимальные амплитуды частот в диапазонах 5–20 и 20–40 мин были примерно одинаковыми.

Алгоритм анализа, основанный на сочетании методов кросс-корреляционного и вейвлет-анализа, подробно описан в работе [47].

Для каждого эксперимента  $i = 1, \dots, N$ , ряды значений HR, а также X- и Y-компонент ГМП были преобразованы согласно следующему алгоритму.

1. Вычислены матрицы вейвлет-коэффициентов  $W(h)_i$ ,  $W(x)_i$ ,  $W(y)_i$ , 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  $i$ -го эксперимента в минутах (рис. 1в,г). Была использована комплексная функция вейвлет-преобразования Морле:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi B}} \exp\left(j2\pi Ct - \frac{t^2}{B}\right).$$

2. Для полученных матриц 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  $1 \times 50$  (рис. 1д,е), отражающие интенсивность каждого из периодов соответственно в рядах HR, X и Y  $i$ -го эксперимента.

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

Вычисление величины  $Q_y$  было выполнено в пространстве размерности не 50 (полная размерность векторов  $[h]$  и  $[y]$ ), а в пространстве размерности  $m = 32$  (для номеров строк  $j = 16, \dots, 47$ ), что соответствует диапазону периодов  $T = 7, \dots, 40$  мин. Такое исключение самых малых ( $T = 3, \dots, 6.7$  мин) и самых больших периодов ( $T = 40, \dots, 50$  мин) при вычислении параметра  $Q$

было сделано, потому что в этих диапазонах наблюдается снижение мощности спектра независимо от установленных границ полосового фильтра. Поэтому их включение в расчет величины  $Q$  приводило бы к снижению чувствительности данного численного показателя к совпадению/несовпадению положения пиков внутри диапазона 7–40 мин. Полностью аналогичным образом был вычислен параметр  $Q_x$  сходства вейвлет-спектров  $W(HR)$  и  $W(X)$ .

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. 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  $Q \geq 0.4$ .

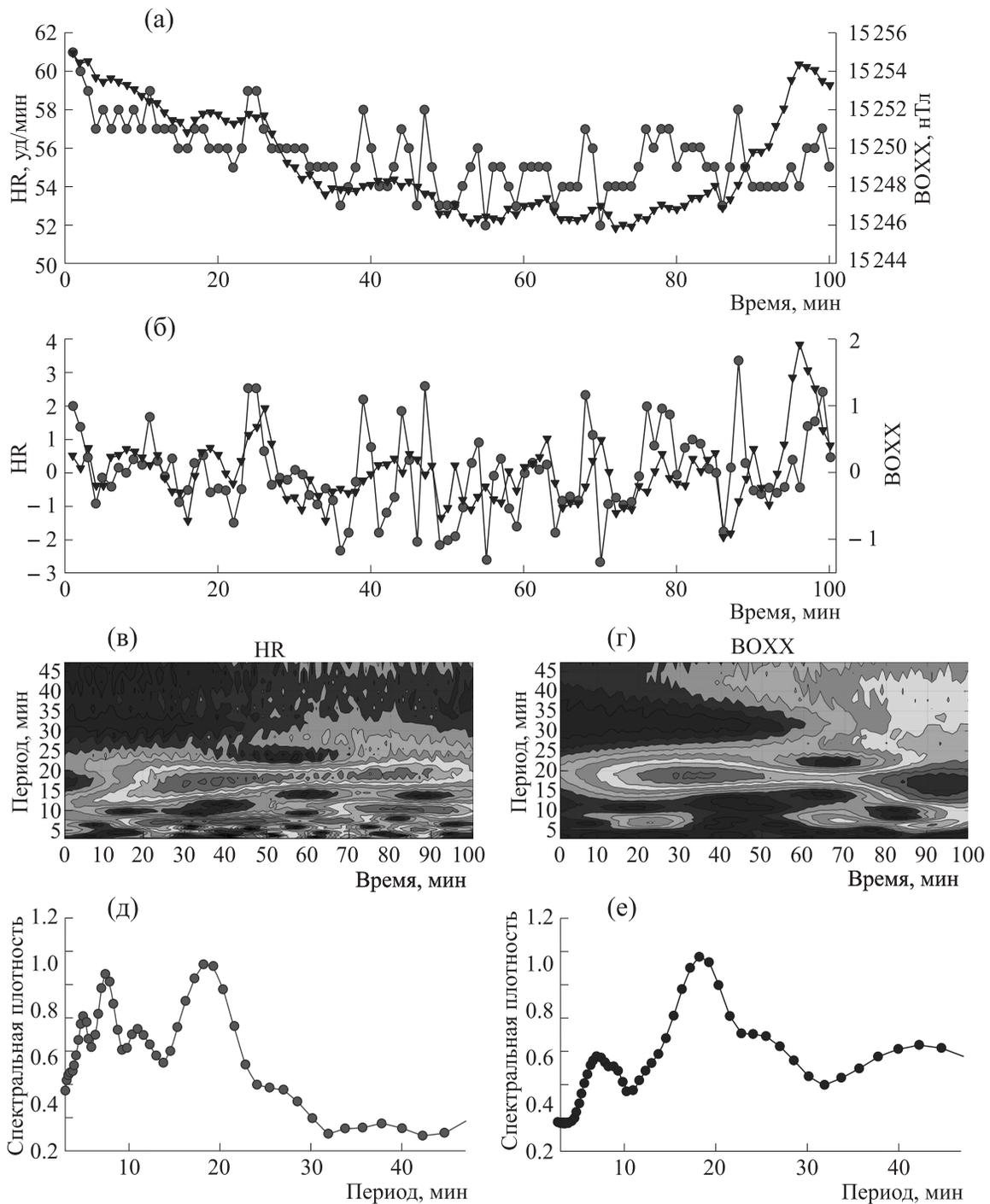
4. Из полученных массивов значений векторов  $[h]_i$ ,  $i = 1, \dots, N$  была сформирована матрица результатов  $G(HR)$  размером  $50 \times N$ , где каждая  $i$ -я строка – вектор значений  $[h]_i$   $i$ -го эксперимента, а каждый  $j$ -й столбец – последовательность амплитуд периода с номером  $j$  по всем  $N$  экспериментам. Аналогичные матрицы  $G(X)$  и  $G(Y)$  были сформированы из векторов  $[x]_i$  и  $[y]_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) соответственно.

Для каждого  $j$  ( $j = 1, \dots, 50$ ) вычисляем коэффициенты корреляции Спирмена  $R_s(j)$  между  $i$ -ми ( $i = 1, \dots, N$ ) значениями в столбцах с номером  $j$  в матрицах  $G(HR)$  и  $G(X)$ . Данный коэффициент корреляции показывает, в какой мере периоды одной величины появляются синхронно во временных рядах HR и каждого из компонент вектора ГМП.

Поскольку между последовательными экспериментами проходило не менее часа, можно считать каждый случай записи ЭКГ независимым от соседних. Следовательно, для оценки синхронности появления определенного периода в последовательности экспериментов в данном случае допустимо использовать традиционный критерий оценки уровня статистической значимости коэффициента корреляции с уровнем  $p < 0.05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 приведены значения возраста волонтеров на момент начала измерений, число выполненных записей сердечного ритма, а также относительного числа случаев наблюдений для каждого из волонтеров, в которых вейвлет-спектры



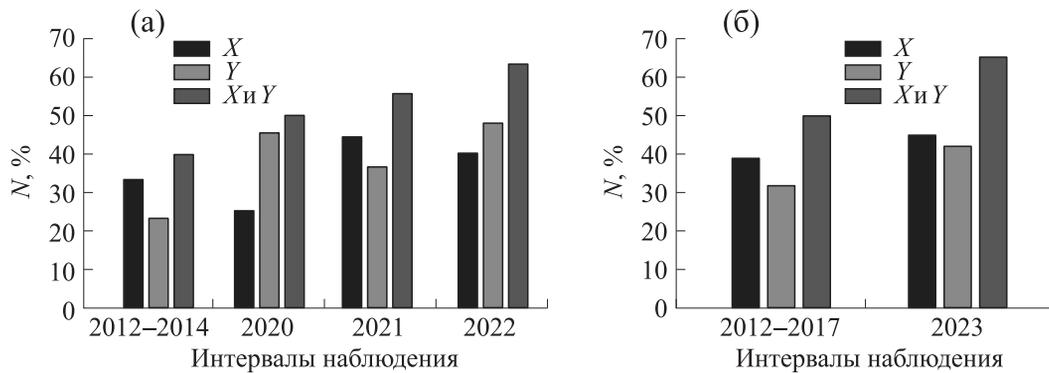
**Рис. 1.** Пример преобразования временного ряда HR и соответствующей ему компоненты ГМП  $X$ : (а) – наложенные исходные временные ряды HR волонтера Б и ГМП  $X$  по станции Борок (BOXX); (б) – ряды из рис. 1а после применения полосового частотного фильтра; (в) – вейвлет-спектр ряда HR; (г) – вейвлет-спектр ряда BOXX; (д) – вектор  $[h]$ ; (е) – вектор  $[x]$ . Эксперимент 11.06.2013 г.

ряда HR оказались близки к спектрам рядов векторов  $X$  и  $Y$  ГМП при пороговом значении  $Q_f = 0.4$ .

Согласно критерию  $\chi$ -квадрат, проценты случаев синхронности по каждой из компонент ГМП

не имеют статистически значимых отличий между волонтерами.

Количество данных наблюдений для волонтеров А и Б позволяет разделить их экспериментальные выборки на несколько частей и оценить



**Рис. 2.** Процентная доля статистически значимых случаев сходства спектров временных рядов HR и синхронных им рядов вариаций компонент  $X$  и  $Y$  вектора ГМП в различные интервалы времени наблюдений: (а) – для волонтера А, (б) – для волонтера Б.

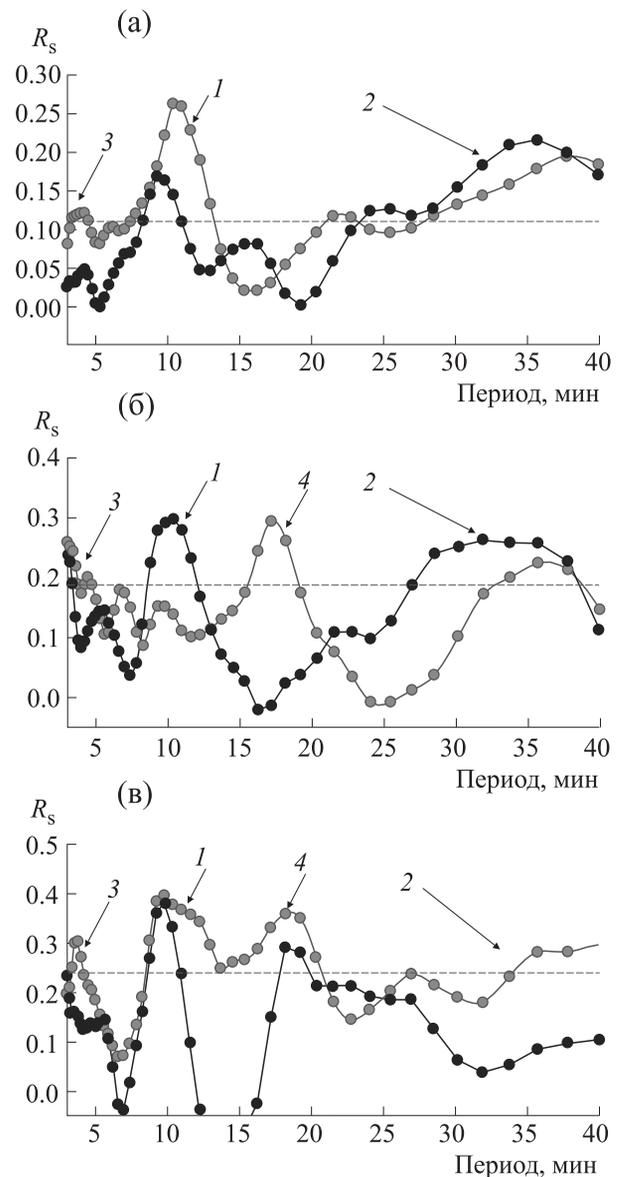
изменения процента числа случаев со временем. На рис. 2а показан процент случаев синхронности для волонтера А в разные интервалы проведения измерений (4 интервала, 2012–2014 гг., 2020 г., 2021 г., 2022 г.), на рис. 2б – аналогичное распределение для волонтера Б (2 интервала, 2012–2017 гг. и 2023 г.).

Если сравнивать на каждом рисунке столбики одного цвета, можно увидеть, что для обоих волонтеров наблюдается тенденция возрастания вероятности наблюдения синхронности со временем, как по каждой из компонент ГМП отдельно, так и по их совокупности (синхронность хотя бы с одной из компонент ГМП). Однако во всех парных сравнениях увеличение доли случаев является статистически незначимым ( $p > 0.05$ ).

**Анализ периодов.** Для каждого волонтера были сформированы матрицы коэффициентов  $G(\text{HR})$ ,  $G(X)$ ,  $G(Y)$  размерами  $50 \times N$ , содержащих величины амплитуд периодов в рядах HR,  $X$  и  $Y$  по полной выборке экспериментов ( $N = 328$  для волонтера А,  $N = 113$  для волонтера Б и  $N = 67$  для волонтера С). Значение коэффициента корреляции между столбцами с одинаковыми номерами в парах матриц  $G(\text{HR}) - G(X)$  (аналогично  $G(\text{HR}) - G(Y)$ ) показывает вероятность одновременного присутствия периода с данным номером в рядах HR и  $X$  (HR и  $Y$ ).

На рис. 3а–в показаны результаты корреляционного анализа матриц  $G(\text{HR}) - G(X)$  (синяя линия) и  $G(\text{HR}) - G(Y)$  (зеленая линия) в выборках результатов волонтеров А (рис. 3а), Б (рис. 3б) и С (рис. 3в). Красный пунктир указывает уровень статистической значимости  $p = 0.05$  с учетом размера каждой конкретной экспериментальной выборки.

Из сравнения рисунков 3а–в можно видеть, что устойчиво выше 5%-го уровня статистической значимости во всех трех случаях наблюдаются



**Рис. 3.** Коэффициенты корреляции  $R_s$  между значениями амплитуд одинаковых по величине периодов в полных экспериментальных выборках: (а) – для волонтера А, (б) – для волонтера Б, (в) – для волонтера С. Пояснения в тексте.

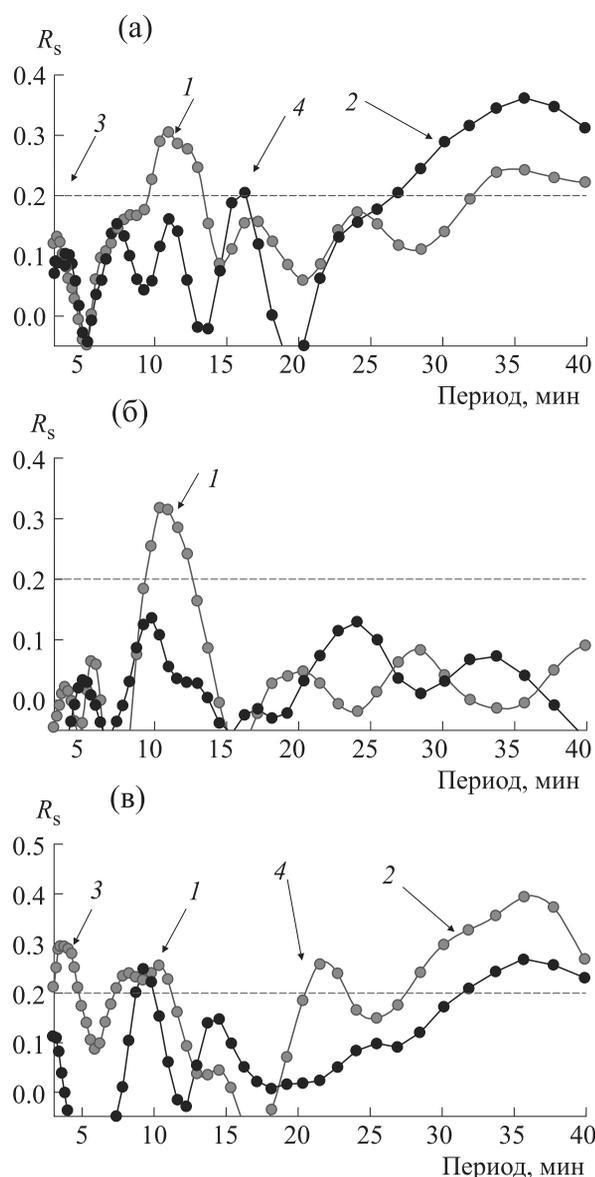


Рис. 4. Коэффициенты корреляции  $R_s$  между значениями амплитуд одинаковых по величине периодов в трех последовательных непересекающихся экспериментальных выборках для волонтера А.

ся периоды нескольких, довольно узких субдиапазонов:

1) 8.3–13.0 мин (максимум – 10.3 мин); в случае волонтеров А и С он проявляется для обеих компонент вектора ГМП, в случае волонтера Б – для  $X$ -компоненты;

2) группа периодов в диапазоне 25–40 мин; для волонтеров А и Б – по обеим компонентам вектора ГМП, в случае волонтера С – по  $Y$ -компоненте;

3) период 3–5 мин присутствуют на всех трех распределениях, однако его статистическая зна-

чимость во всех случаях лишь незначительно превышает порог  $p = 0.05$ . Есть вероятность, что невысокая значимость обусловлена отчасти снижением усредненной спектральной мощности как для биологического, так и для геофизического ряда в этом диапазоне (3–7 мин);

4) также для волонтеров Б и С наблюдается статистически значимый период 15.3–18.2 мин. На рис. 3а у него нет точных аналогов, присутствует только небольшой пик, соответствующий 22 мин.

Чтобы уточнить степень устойчивости наблюдаемых периодов, разобьем множество экспериментов волонтера А на 3 непересекающихся равных отрезка общей выборки (рис. 4).

В целом статистически значимые периоды наблюдаются во всех трех выборках и примерно в одних и тех же диапазонах, совпадающих с максимумами на рис. 3. При этом наиболее устойчивым, присутствующим на всех трех отрезках, является период в районе 10 мин, хотя границы несколько различаются на разных рисунках. Периоды в 30–40 мин оказываются статистически значимыми в двух выборках (рис. 4а,в). Остальные диапазоны сильно варьируют.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Избранный нами в данном исследовании дизайн длительных многократных наблюдений на примере ограниченного числа волонтеров обладает рядом достоинств и недостатков. К достоинствам можно отнести, в первую очередь, возможность изучить особенности проявления эффекта синхронизации, исключив фактор межиндивидуальных различий магниточувствительности у разных людей. Кроме того, нам удалось экспериментально обосновать отдельные методические моменты проведения таких наблюдений, например, показать, что длительность каждого измерения в диапазоне 100–120 мин является оптимальной с точки зрения баланса точности выявляемых периодов и накапливаемой усталости испытуемого. Также выбранное нами положение испытуемого в процессе проведения измерений (состояние покоя, но не сна) обеспечивает, на наш взгляд, наилучшее устранение возможных внешних и внутренних неконтролируемых помех по сравнению с другими возможными способами измерений, таких как длительный мониторинг в процессе повседневной жизни и измерения во сне.

К недостаткам метода следует отнести, во-первых, ограниченность по времени каждого измерения (не более 120 мин, поскольку далее неподвижное положение испытуемого приводит к постепенному возрастанию у него уровня стресса), что не позволяет в будущем расширить анализи-

руемый диапазон в сторону более низких частот, во-вторых — отсутствие достаточных оснований для автоматического распространения полученных результатов на других лиц, не принимавших участия в эксперименте. Для верификации результатов необходимо большее число испытуемых разного возраста, пола и медицинского статуса.

Полученные нами зависимости степени выраженности эффекта от возраста волонтеров указывают на то, что в нашем случае она проявляется крайне слабо: несмотря на большие размеры индивидуальных экспериментальных выборок, мы получили статистически неразличимые уровни выраженности эффекта у трех волонтеров, а также у волонтеров А и Б в разные интервалы времени наблюдений.

Мы получили результат, указывающий, что не все периоды из исследованного частотного диапазона в равной степени вовлечены в процесс подстройки ритма сердца под ритм колебаний вектора ГМП. У всех троих волонтеров наиболее воспроизводимо синхронизация проявляется в диапазоне периодов колебаний 8–13 мин (с максимумом для периода, близкого к 10 мин). Колебания данной частоты присутствуют в сердечном ритме именно в тех сериях наблюдений, когда данный период наблюдается в спектре компонент ГМП.

Полученные нами результаты укладываются в следующую гипотетическую схему развития процесса синхронизации:

а) в спектре ГМП возникают устойчивые колебания с периодом, близким к 10 мин (из диапазона 8–13 мин);

б) эти колебания провоцируют в организме человека «захват ритма» и, возможно, увеличение амплитуды колебаний некоторого физиологического процесса (например, нейромедиаторный, электролитный, гуморальный или иной природы), который имеет период собственных колебаний в этом диапазоне и который (в свою очередь) может влиять на сердечную ритмику;

с) данный физиологический процесс начинает оказывать больший вклад в формирование сердечной ритмики, в результате чего период колебаний около 10 мин проявляется и в спектре сердечного ритма.

Ранее мы предположили, что наблюдаемое сходство спектров сердечного ритма и вариаций вектора ГМП в диапазоне периодов 3–40 мин может быть просто следствием существования синхронизации в динамике более высокочастотных процессов (с характерными частотами порядка 1 Гц), о которых сообщалось в работах [17, 38–40]. В пользу этого предположения говорит, во-пер-

вых, то, что именно в этом диапазоне (ежесекундные значения бит-ту-бит с максимально допустимым сдвигом на 50 с) находили синхронизацию сердечного ритма и ГМП [39]. Во-вторых, это косвенно подтверждается результатами работы [37], где чем более сдвигали левую границу фильтра в сторону высоких частот, исключая из временных рядов низкочастотные компоненты спектра, тем для большего количества испытуемых обнаруживалась корреляция параметров ВСР с вариациями вектора ГМП. Все вместе эти факты говорят о целесообразности в дальнейшем увеличения частоты дискретизации данных в наших экспериментах и сдвиге границ исследуемого диапазона в сторону более коротких периодов.

В то же время существование выделенных устойчивых периодов, для которых эффект синхронизации выражен в большей степени, чем для соседних, противоречит этому предположению и скорее указывает на существование некоторого самостоятельного процесса, имеющего характерную частоту (или частоты) в данных субдиапазонах.

Из литературы известно, что довольно часто резонансные колебания геомагнитных пульсаций P<sub>c5</sub> регистрируются на устойчивых дискретных частотах: 1.3 мГц (12.8 мин), 1.9 мГц (8.7 мин), 2.6 мГц (6.4 мин) и 3.4 мГц (4.9 мин) (см., например, работы [49, 50]). Необходимо отметить, что первые два из указанных значений близки к границам диапазона 1, наблюдаемого нами в колебаниях показателя HR (рис. 3), а последний из перечисленных — к значению диапазона 3.

С другой стороны, физиологические процессы, обуславливающие синхронизацию, могут быть связаны с вегетативной и центральной нервной системой, деятельностью баро- и хеморецепторов, дыхательной и эндокринной регуляцией [51]. Известно, что барорефлекс и прямое взаимодействие парасимпатической и симпатической систем регуляции определяют пропорции низкочастотных и высокочастотных составляющих в спектре колебаний ВСР [52]. Включенность механизма барорефлекса в формирование биологического ответа на действие вариаций ГМП обсуждается в работах [37, 53].

Дыхательные ритмы человека в покое [54, 55] содержат периоды 1, 2.5, 4, 10, 20, 40 мин и 2.5 ч. В спектрах ежеминутных значений стабильных метаболитов оксида азота NO<sub>x</sub> наблюдались периоды 7, 13 и 25–30 мин, и они были близки как к периодам сердечного ритма, так и к периодам спектров синхронных им вариаций вектора ГМП [48].

Все перечисленные процессы могут быть потенциальными участниками формирования фи-

зиологического ответа на вариации ГМП, что требует дальнейшего исследования.

Изучение феноменологии эффекта синхронизации (зависимость от состояния окружающей среды, анамнестических данных и текущего функционального состояния человека) актуально не только с фундаментальной биофизической точки зрения, но и с медицинской. В данном исследовании принимали участие здоровые люди, организм которых обладает хорошими адаптационными резервами, и реакция на вариации вектора ГМП не выводило их сердечный ритм за пределы физиологической нормы. Однако для лиц с некоторыми нарушениями сердечно-сосудистой системы, такими, как нестабильность функции синусового узла, наличие внешнего фактора, влияющего на генерацию сердечного импульса, может представлять опасность. Такой внешний фактор потенциально может увеличивать риск возникновения миграции сердечного водителя ритма, эпизодов нарушений ритма по типу экстрасистолии, особенно политопной (из нескольких отделов миокарда), пароксизмальной тахикардии и иных состояний, которые могут существенно повлиять на сократительную функцию сердечной мышцы. У лиц с длительным стажем сердечных заболеваний (артериальная гипертензия, ишемическая болезнь сердца, сердечная недостаточность) значительные вариации вектора ГМП могут оказаться причиной для возникновения таких угрожающих жизни состояний как фибрилляция и трепетание отделов сердца.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты, представленные в этой статье, были получены с использованием геофизических данных, собранных обсерваториями Sodankyla, Nurmijarvi, Borok, Kiev, Panagjurishte и Surlari. Авторы благодарят Метеорологический институт Финляндии (Finnish Meteorological Institute), геофизическую обсерваторию «Борок» и Геофизический институт Болгарской Академии наук (Geophysical Institute of Bulgarian Academy of Science) за предоставленные данные и их деятельность в рамках проекта INTERMAGNET по распространению высоких стандартов геофизических наблюдений ([www.intermagnet.org](http://www.intermagnet.org)).

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы Государственного задания ИТЭБ РАН № 075-00224-24-03 и Государственного задания ИКИ РАН, тема «Плазма».

### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

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

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gray L. J., Beer J., Geller M., Haigh J. D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G. A., Shindell D., van Geel B., and White W. Solar influences on climate. *Rev. Geophys.*, **48** (4), (2010). DOI: 10.1029/2009rg000282
2. Price C. ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. *Atmosphere*, **116** (7), (2016). DOI: 10.3390/atmos7090116
3. Anagnostopoulos G., Spyroglou I., Rigas A., Preka-Papadema P., Mavromichalaki H., and Kiosses I. The sun as a significant agent provoking earthquakes. *Eur. Phys. J. Spéc. Top.*, **230**, 287–333 (2021). DOI: 10.1140/epjst/e2020-000266-2
4. Turner L. R., Barnett A. G., Connell D., and Tong S. Ambient temperature and cardiorespiratory morbidity: a systematic review and meta-analysis. *Epidemiology*, **23** (4), 594–606 (2012). [www.jstor.org/stable/23214303](http://www.jstor.org/stable/23214303)
5. Kenney W. L., Craighead D. H., and Alexander L. M. Heat waves, aging, and human cardiovascular health. *Med. Sci. Sports Exerc.*, **46** (10), 1891–1899 (2014). DOI: 10.1249/MSS.0000000000000325
6. Patrakeeva V. P. and Basova E. E. Effects of low temperatures on the formation of adaptive reactions: a review. *Int. J. Biomed.*, **8** (2), 95–101 (2018). DOI: 10.21103/Article8(2)\_RA1
7. Palmer S. J., Rycroft M. J., and Cermack M. Solar and geomagnetic activity, extremely low frequency magnetic and electric fields and human health at the Earth's surface. *Surv. Geophys.*, **27**, 557–595 (2006). DOI: 10.1007/s1071 2-006-9010-7
8. Бреус Т. К., Бинги В. Н. и Петрукович А. А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы. *Успехи физ. наук*, **186** (5), 568–576 (2016).
9. Cornelissen G., Tarquini R., Peretto F., Otsuka K., Gigolashvili M., and Halberg F. Investigation of solar about 5-month cycle in human circulating melatonin: Signature of weather in extraterrestrial space? *Sun Geosph.*, **4**, 55–59 (2009).
10. Cornelissen G., Halberg F., Sothorn R. B., Hillman D. C., and Siegelova J. Blood pressure, heart rate and melatonin cycles synchronization with the season, earth magnetism and solar flares. *Scr. Med.*, **83**, 16–32 (2010).

11. Zenchenko T. A. and Breus T. K. The possible effect of space weather factors on various physiological systems of the human organism. *Atmosphere*, **12**, 346 (2021). DOI: 10.3390/atmos12030346
12. Андропова Т. И., Деряпа Н. Р. и Соломатин А. П. *Гелиометеотропные реакции здорового и больного человека* (Медицина, Л., 1982).
13. Колесник А. Г., Побаченко С. В. и Соловьев А. В. Оценка сопряженности показателей ЭЭГ мозга с параметрами фоновых инфразвуковых колебаний давления по данным мониторинговых исследований. *Геофизические процессы и биосфера*, **12** (1), 70–80 (2013).
14. Горго Ю. П. и Дидык Л. А. Особенности влияния сверхнизкочастотных колебаний атмосферного давления на сердечную деятельность и умственные нагрузки человека. В сб. *Тез. междисциплинар. семинара «Биологические эффекты солнечной активности»* (Пушино, 2004), сс. 28–29.
15. Cherry N. Schumann resonances, a plausible biophysical mechanism for the human health effects of Solar. *Natural Hazards*, **26**, 279–331 (2002). DOI: 10.1023/A:1015637127504
16. Cifra M., Apollonio F., Liberti M., García-Sánchez T., and Mir L. M. Possible molecular and cellular mechanisms at the basis of atmospheric electromagnetic field bioeffects. *Int. J. Biometeorol.*, **65**, 59–67 (2020). DOI: 10.1007/s00484-020-01885-1
17. Колесник А. Г., Бородин А. С., Колесник С. А. и Побаченко С. В. Резонансный механизм солнечно-земных связей. *Изв. высших учебных заведений. Физика*, **46** (8), 23–30 (2003).
18. Птицына Н. Г., Виллорези Дж., Дорман И., Юччи Н. и Тясто М. И. Естественные и техногенные низкочастотные магнитные поля как факторы потенциально опасные для здоровья (обзор). *Успехи физ. наук*, **168** (7), 768–791 (1998).
19. Anagnostopoulos G., Basta M., Vgontzas A., Rigas A., Vassiliadis V., Baloyannis S., and Koutsomitros T. Differential effects of earthquakes on patients with bipolar disorder versus schizophrenia: Findings from Crete, Greece, 2008–2010. *Psychiatriki*, **30**, 193–203 (2019) DOI: 10.22365/jpsych.2019.303.193
20. Белишева Н. К., Жиров В. К. и Вашенюк Э.В. Реакции растения *taranta leuconeura* «fascinator» на солнечные протонные события, связанные с наземным увеличением нейтронного счета. В сб. *Тез. междисциплинар. семинара «Биологические эффекты солнечной активности»* (Пушино, 2004), с. 45.
21. Papailiou M.-C., Ioannidou S., Tezari A., and Mavromichalaki H. Geomagnetic and cosmic ray activity effect on heart rate during the solar cycle 24. *Atmosphere*, **15** (2), 158 (2024) DOI: 10.3390/atmos15020158
22. Dorman L. I., Iucci N., Ptitsyna N. G., and Villosesi G. Cosmic rays as indicator of space weather influence on frequency of infract myocardial, brain strokes, car and train accidents. In *Proc. 27th Int. Cosmic Ray Conf.* (Hamburg, Germany, 2001), p. 3511.
23. Papailiou M., Mavromichalaki H., Kudela K., Setiarova J., Dimitrova S., and Giannaropoulou E. The effect of cosmic ray intensity variations and geomagnetic disturbances on the physiological state of aviators. *Astrophys. Space Sci. Trans.*, **7**, 373–377 (2011). DOI: 10.5194/astra-7-373-2011
24. Vencloviene J., Tamosiunas A., Radisauskas R., Luksiene D., Vaiciulis V., Bernotiene G., and Bobak M. The influence of the North Atlantic Oscillation index on arterial blood pressure. *J. Hypertens.*, **37**, 513–521 (2019). DOI: 10.1097/hjh.0000000000001929
25. Владимирский Б. М., Волынский А. М., Виноградов С. А., Бродовская З. И., Темурьянц Н. А., Ачкасова Ю. Н., Розенберг В. Д. и Челкова Ж. Д. Экспериментальное исследование влияния электромагнитных полей сверхнизкой частоты на теплокровных животных и микроорганизмы. В кн. *Влияние солнечной активности на атмосферу и биосферу Земли* (Наука, М., 1971), сс. 224–233.
26. Темурьянц Н. А., Макеев В. Б. и Малигина В. Ш. Влияние слабых магнитных полей ультранизких частот на инфранианную ритмику симпатoadреновой системы крыс. *Биофизика*, **37** (4), 551–553 (1992).
27. Pishchalnikov R. Y., Gurfinkel Y. I., Sarimov R. M., Vasin A. L., Sasonko M. L., Matveeva T. A., Binhi V. N., and Baranov M. V. Cardiovascular response as a marker of environmental stress caused by variations in geomagnetic field and local weather. *Biomed. Signal. Process. Control*, **51**, 401–410 (2019). DOI: 10.1016/j.bspc.2019.03.005
28. Крылов В. В., Осипова Е. А., Панкова Н. А., Таликина М. Г., Чеботарева Ю. В., Изюмов Ю. Г., Батракова А. А. и Непомнящих В. А. Влияние временного смещения суточной геомагнитной вариации на эмбрионы плотвы *rutilus rutilus* L. Сравнение с эффектами имитации геомагнитных бурь. *Биофизика*, **62** (4), 825–832 (2017).
29. Белова Н. А. и Леднев В. В. Активация и ингибирование гравитротической реакции растений с помощью слабых комбинированных магнитных полей. *Биофизика*, **45** (6), 1102–1107 (2000).
30. Агаджанян Н. А. и Власова И. Г. Влияние инфранизкочастотного магнитного поля на ритмику нервных клеток и их устойчивость к гипоксии. *Биофизика*, **37** (4), 681–689 (1992).
31. Темурьянц Н. А. *Влияние слабых электромагнитных полей сверхнизкой частоты на морфологию и некоторые показатели метаболизма лейкоцитов периферической крови*. Дис. ... канд. мед. наук (Симферополь, 1972).
32. Elhalel G., Price C., Fixler D. and Shainberg A. Cardioprotection from stress conditions by weak magnetic fields in the Schumann resonance band. *Sci. Rep.*, **9**, 1645 (2019). DOI: 10.1038/s41598-018-36341-z

33. Цимбалюк О. В. и Мартынюк В. С. Влияние магнитного поля крайне низкой частоты на вызванную  $K^+$ -деполяризацией и ацетилхолином сократительную активность интестинальных гладких мышц. *Физика живого*, **19** (1), 20–24 (2011).
34. Cornelissen G., Halberg F., Gheonjian L., Paatashvili T., Faraone P., Watanabe Y., Otsuka K., Sothorn R. B., Breus T., Baevsky R., et al. Schwabe's ~10.5- and Hale's ~21-year cycles in human pathology and physiology. In *Long- and Short-Term Variability in Sun's History and Global Change*, Ed. by W. Schröder (Bremen, Germany, 2000), pp. 79–88.
35. Halberg F., Cornelissen G., Otsuka K., Watanabe Y., Katinas G. S., Burioka N., Delyukov A., Gorgo Y., Zhao Z., Weydahl A., Sothorn R. B., Siegelova J., Fiser B., Dusek J., Syutkina E. V., Perfetto F., Tarquini R., Singh Rh. B., Rhees B., Lofstrom D., Lofstrom P., Johnson P. W., and Schwartzkopff O. Cross-spectrally coherent ~10.5- and 21-year biological and physical cycles, magnetic storms and myocardial infarctions. *Neuroendocrinol. Lett.*, **21** (3), 233–258 (2000).
36. Бреус Т. К. и Рапопорт С. И. *Магнитные бури – медико-биологические и геофизические аспекты* (Советский спорт, М., 2003).
37. Poskotinova L., Krivonogova E., Demin D., and Zenchenko T. Differences in the sensitivity of the baroreflex of heart rate regulation to local geomagnetic field variations in normotensive and hypertensive humans. *Life*, **12**, 1102 (2022). DOI: 10.3390/life12071102
38. Побаченко С. В., Колесник А. Г., Бородин А. С. и Калюжин В. В. Сопряженность параметров энцефалограммы мозга человека и электромагнитных полей шумановского резонатора по данным мониторинговых исследований. *Биофизика*, **51** (3), 534–538 (2006).
39. Timofejeva I., McCraty R., Atkinson M., Joffe R., Vainoras A., Alabdulgader A., and Ragulskis M. Identification of a group's physiological synchronization with Earth's magnetic field. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **14** (9), 998 (2017). DOI: 10.3390/ijerph14090998
40. Alabdulgader A., McCraty R., Atkinson M., Dobyns Y., Stolc V., and Ragulskis M. Long-term study of heart rate variability responses to changes in the solar and geomagnetic environment. *Sci. Rep.*, **8** (1), 2663 (2018). DOI: 10.1038/s41598-018-20932-x
41. Максимов А. Л., Волков А. И., Савинцева А. А., Шабанов Г. А., Лебедев Ю. А. и Рыбченко А. А. О резонансном взаимодействии шумановских биосферных частот и ритмов головного мозга человека. В сб. *Тезисы VI Международного Конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения»* (Санкт-Петербург, 2012), с. 168. [www.biophys.ru/archive/congress2012/proc-p168.pdf](http://www.biophys.ru/archive/congress2012/proc-p168.pdf)
42. Бреус Т. К., Гурфинкель Ю. И., Зенченко Т. А. и Ожередов В. А. Сравнительный анализ чувствительности различных показателей сосудистого тонуса к метеорологическим и геомагнитным факторам. *Геофизические процессы и биосфера*, **9** (2), 23–36 (2010). DOI: 10.1134/S0001433810080050
43. Крылов В. В., Осипова Е. А., Панкова Н. А., Таликина М. Г., Чеботарева Ю. В., Изюмов Ю. Г., Батракова А. А. и Непомнящих В. А. Влияние временного смещения суточной геомагнитной вариации на эмбрионы плотвы *rutilus rutilus* L. Сравнение с эффектами имитации геомагнитных бурь. *Биофизика*, **62** (4), 825–832 (2017).
44. Зенченко Т. А. и Бреус Т. К. Возможные причины нестабильности воспроизведения гелиобиологических результатов. *Физика биологии и медицины*, **1**, 4–25 (2023). DOI: 10.7256/2730-0560.2023.1.39903
45. Зенченко Т. А., Медведева А. А., Хорсева Н. И. и Бреус Т. К. Синхронизация показателей сердечного ритма человека и вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0.5–3 мГц. *Геофизические процессы и биосфера*, **12** (4), 73–84 (2013).
46. Зенченко Т. А., Йорданова М., Поскотинова Л. В., Медведева А. А., Аленикова А. Э. и Хорсева Н. И. Синхронизации сердечного ритма человека с геомагнитными пульсациями Pc5 на разных широтах. *Биофизика*, **59** (6), 1186–1194 (2014).
47. Zenchenko T. A., Khorseva N. I., and Breus T. K. Long-Term Study of the Synchronization Effect between Geomagnetic Field Variations and Minute-Scale Heart-Rate Oscillations in Healthy People. *Atmosphere*, **15**, 134 (2024). DOI: 10.3390/atmos15010134
48. Зенченко Т. А., Медведева А. А., Потолицина Н. Н., Паршукова О. И. и Бойко Е. Р. Соотношение динамики минутных колебаний пульса и биохимических показателей крови здоровых лиц с геомагнитными пульсациями Pc5-6. *Биофизика*, **60** (2), 385–394 (2015).
49. Samson J. C., Harrold B. G., Ruohoniemi J. M., Greenwald R. A., and Walker A. D. M. Field line resonances associated with MHD waveguides in the magnetosphere. *Geophys. Res. Lett.*, **19**, 19441–19444 (1992). DOI: 10.1029/92GL00116
50. Ziesolleck C. W. S. and McDiarmid D. R. Statistical survey of auroral latitude Pc5 spectral and polarization characteristics. *J. Geophys. Res.*, **100** (10), 19299–19312 (1995). DOI: 10.1029/95JA00434
51. Shaffer F. and Ginsberg J. P. An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Front. Public Health*, **5**, 258 (2017). DOI: 10.3389/fpubh.2017.00258
52. Shaffer F., McCraty R., and Zerr C. A healthy heart is not a metronome: An integrative review of the heart's anatomy and heart rate variability. *Front. Psychol.*, **5**, 1040 (2014). DOI: 10.3389/fpsyg.2014.01040
53. Gmitrov J. Baroreceptor stimulation enhanced nitric oxide vasodilator responsiveness, a new aspect of baroreflex physiology. *Microvasc. Res.*, **98**, 139–144 (2015). DOI: 10.1016/j.mvr.2014.11.004
54. Goodman L., Alexander D. M., Fleming D. G. Oscillatory behavior of respiratory gas exchange in resting

- man. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, **13** (2), 57–64 (1966).  
DOI: 10.1109/tbme.1966.4502407
55. Usuda N., Shirakawa K., Hatano K., Abe M., Yunoki T., and Yano T. Coherence between oscillations in the cardiorespiratory system and tissue oxygen index in muscle recovering from intensive exercise in humans. *Physiol. Int.*, **106** (3), 261–271 (2019).  
DOI: 10.1556/2060.106.2019.25

## The Effect of Synchronizing the Human Heart Rhythm with Geomagnetic Field Variations: Are There Distinguished Frequencies?

T.A. Zenchenko\*, \*\*, N.I. Khorseva\*\*\*, and A.A. Stankevich\*

\**Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Institutskaya ul. 3, Pushchino, Moscow Region, 142290 Russia*

\*\**Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya ul. 84/32, Moscow, 117997 Russia*

\*\*\**N.M. Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, Moscow, 119334 Russia*

Ongoing research continues to explore the phenomenology of the effect of synchronization between oscillations of a human resting heart rate and variations of the geomagnetic field in the period range 3–40 minutes. A total of 508 experiments have been conducted for the period 2012–2023 (each experiment lasted 100–120 minutes) to monitor the minute indicators of heart rate for three healthy women (55, 45, and 30 years old). 328, 113, and 67 measurements were made, respectively. The results indicate that, for each of these three volunteers, approximately 60% of the experiments yielded a wavelet spectrum of heart rate values that closely resembled the spectrum of synchronous variations of at least one of the horizontal components of the geomagnetic field ( $X$  or  $Y$ ). Additionally, within the investigated frequency range of 3–40 minutes, three sub-bands were identified and in these sub-bands, the degree of synchrony of oscillations was maximal: 3.5 minutes, 10–12 minutes and 33–36 minutes. It can be concluded that the effect of biogeosynchronization is not uniformly implemented over the entire range from 3 to 40 minutes, but it is mainly evident in these sub-bands.

*Keywords: solar-biosphere connections, biorhythmology, rhythm synchronization, geomagnetic field variations, magnetic sensitivity, heart rate*