

УДК 577.3
PACS 87.50.–a

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЦИКЛА «АКТИВНОСТЬ–ПОКОЙ» У МЫШЕЙ С ВАРИАЦИЯМИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МИЛЛИГЕРЦОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ

© 2021 г. В.Б. Дорохов^{1*}, Г.Н. Арсеньев¹, Д.С. Сахаров¹, О.Н. Ткаченко¹,
М.Е. Диатроптов², Т.А. Зенченко^{3,4}

¹ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, г. Москва, Россия

² Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, г. Москва, Россия

³ Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН, г. Пушкино,
Московская обл., Россия

⁴ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия

* e-mail: vbdorokhov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.04.2021 г.; после доработки 05.07.2021 г.
Принята к публикации 19.07.2021 г.

Аннотация. Целью работы было исследование синхронизации двигательной активности мышечной, отражающей цикл «активность–покой», с вариациями X -компоненты вектора геомагнитного поля (ВОХХ) в диапазоне колебаний 10–120 мин. Показателем двигательной активности являлась доля пикселей на видеозаписи, изменивших свою интенсивность за 10 с. Регистрацию проводили одновременно у 16 самцов линии C57BL/6 в октябре 2019 г. (г. Москва). Мыши содержались поодиночке в пластиковом боксе ($t = 22–26$ °C) при искусственном 12-часовом световом режиме, свободном доступе к воде и пище. Анализ степени сходства биологического и ВОХХ-показателя проводили для каждого животного посредством оценки степени корреляционного сходства их фурье-спектров на каждом 12-часовом отрезке дневных и ночных интервалов. Полученные результаты, усредненные по группе, показали, что многим гармоникам в интервале 50–120 мин соответствуют равные по величине гармоники геофизического ряда, при этом функция кросс-корреляции рядов имеет статистически значимый абсолютный максимум при нулевом временном лаге между рядами. При индивидуальном анализе в 18 % случаев наблюдалась статистически значимая корреляция между спектрами цикла «активность–покой» и ВОХХ. Это свидетельствует о подстройке биологического ритма под вариации геофизического ритма, что согласуется с полученным ранее эффектом подстройки ритмов сердечной и мозговой деятельности человека под внешний ритмодатчик – геомагнитное поле.

Ключевые слова: биологические ритмы, магниточувствительность, синхронизация колебаний.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2021.3-5>

Цитирование: Дорохов В.Б., Арсеньев Г.Н., Сахаров Д.С., Ткаченко О.Н., Диатроптов М.Е., Зенченко Т.А. Синхронизация показателей цикла «активность–покой» у мышей с вариациями геомагнитного поля в миллигерцовом диапазоне частот // Геофизические процессы и биосфера. 2021. Т. 20, № 3. С. 76–90. <https://doi.org/10.21455/GPB2021.3-5>

ВВЕДЕНИЕ

Одним из широко известных проявлений солнечно-биосферных связей является присутствие солнечной ритмики в биологических процессах. Это явление наблюдается на разных пространственно-временных масштабах (см. обзоры [Темурьянц и др., 1992; Владимирский, Темурьянц, 2000; Бреус и др., 2016; Zenchenko, Breus, 2021]).

Так, 11-летний ритм солнечной активности обнаруживается в возникновении эпидемий [Чижевский, 1976; Hayes, 2010; Gumarova et al., 2013; Qu, 2016; Wickramasinghe, 2020], сильных всплесках смертности [Vieira et al., 2018] и неинфекционных болезней, например сердечно-сосудистых [Halberg et al., 2000; Cornelissen et al., 2002] или психических [Davis, Lowell, 2006].

Инфраниантные ритмы, присутствующие в динамике солнечного ветра и возмущенности геомагнитного поля (ГМП) (28, 14, 9, 6.8, 5.4, 4.5 сут и т.д.), многократно наблюдались в суточной динамике популяционных показателей (например, росте осложнений сердечно-сосудистых заболеваний, увеличении количества суицидов и др.) [Cornelissen et al., 2002; Бреус и др., 2016], индивидуальной ритмике ряда физиологических показателей у человека [Halberg et al., 1991; Бреус и др., 1995; Корнелиссен и др., 1998], животных [Комаров и др., 1994], в том числе простейших организмов [Schweiger et al., 1986; Кузнецов, 1992].

В последнее время все большее внимание исследователей привлекает проявление синхронизации геофизической и биологической ритмики на внутрисуточном масштабе времени. Такая синхронизация показана для

ритмических процессов в мозге и сердце человека. Так, показатели общей спектральной мощности ЭЭГ, усредненные по группе здоровых волонтеров, изменяются синхронно с изменениями интенсивности первой моды шумановских резонансов (8 Гц), причем эта синхронизация возрастает при повышении общего уровня солнечной активности [Лобаченко и др., 2006; Saroka et al., 2016]. Индивидуальная чувствительность ритмо-задающих структур мозга человека в высокочастотной (14–35 Гц) и низкочастотной (до 4 Гц) частях спектра ЭЭГ оказалась связанной с вариациями горизонтальной компоненты ГМП [Поскотинова и др., 2018].

В ряде исследований проведен анализ длинных многодневных записей ЧСС в группах здоровых волонтеров и эти данные сопоставлены с динамикой интенсивности шумановских резонансов и вариаций полного вектора ГМП [Alabdulgade et al., 2015, 2018; McCraty et al., 2017; Timofejeva et al., 2017].

В другом цикле работ было показано, что у находящегося в покое здорового человека сердечный ритм подстраивается под синхронные вариации вектора геомагнитного поля в диапазоне периодов колебаний от 3 до 30 мин (миллигерцовый диапазон частот 0.56–5.56 мГц, близкий к частотам геомагнитных пульсаций РС5-6) [Зенченко и др., 2013, 2014, 2015]. Данный эффект наблюдался примерно в 60 % из 230 проведенных индивидуальных ЭКГ-регистраций и не зависел от географической точки наблюдения.

Существенных сдвигов средних значений кардио-параметров за пределы физиологической нормы в этих исследованиях не зарегистрировано, что позволяет говорить о том, что наблюдается синхронизация сердечного ритма при нормальном режиме функционирования исследуемых систем организма.

Авторы исследований, проводившие индивидуальный анализ особенностей ритмики, подчеркивают, что такие характеристики реакции, как амплитуда колебаний и сдвиг фазы, у разных индивидуумов различаются [Зенченко и др., 2013, 2014; Alabdulgade et al., 2015; Timofejeva et al., 2017; Поскотинова и др., 2018]. Таким образом, усредненные по группе результаты исследований магнитобиологической синхронизации подтверждают принципиальное существование эффекта, а индивидуальные говорят о значительной межиндивидуальной вариабельности. Можно сделать вывод, что операция усреднения по группе в значительной степени сглаживает выраженность эффекта.

Результаты исследований, проведенных на животных, свидетельствуют о наличии синхронизации между физиологическими ритмами в диапазоне периодов 10–120 мин (0.14–1.67 мГц) у разных особей, даже находящихся на значительном удалении друг от друга [Dzaililova et al., 2019; Диатроптов и др., 2020а, б]. Такой эффект позволяет предполагать наличие внешнего ритмодатчика, однако в упомянутых исследованиях прямой синхронизации с какими-либо конкретными геофизическими ритмами не установлено.

Мы видим, что эффект синхронизации проявляется в процессах, связанных с центральной и вегетативной нервной системой. Можно предполагать, что аналогичный «захват ритма» может проявляться и в цикле «активность–покой». Исследование этого эффекта важно с точки зрения оценки возможного вклада геомагнитного

фактора в самочувствие людей. Показано [Ohayon et al., 2019; Dorokhov et al., 2020], что слабые искусственные электромагнитные поля сверхнизкой частоты оказывают положительное влияние на сон человека.

Для мелких грызунов, в том числе и мышей, характерны часто сменяющиеся периоды покоя и активности. Считается, что в формировании таких циклов вовлечена дофаминергическая система головного мозга [Bourguignon, Storch, 2017]. Это утверждение основано на факте синхронного с ультрадианными циклами двигательной активности колебаний уровня дофамина в структурах полосатого тела. Мутация в гене транспортера дофамина *Slc6a3^{-/-}* приводит к увеличению периода ультрадианного ритма двигательной активности [Blum et al., 2014].

Целью данной работы было обнаружение и предварительное исследование возможного эффекта биогеофизической синхронизации у животных в отношении ритмики двигательной активности, отражающего цикл «активность–покой».

Нами были поставлены и решены три задачи:

- разработка метода выявления синхронизации с учетом специфики биологических и геофизических данных (ранее подобных исследований не проводилось);
- выявление эффекта синхронизации на тестовой группе животных при среднегрупповом и индивидуальном анализе;
- предварительное исследование характеристик эффекта, а именно, его распределенность внутри группы животных во времени, наличие или отсутствие преимущественных частот.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Постановка эксперимента и регистрация данных

Для анализа использовали данные об интенсивности двигательной активности, непрерывно регистрируемые одновременно у 16 мышей (линия C57BL/6, самцы) в период с 7 (ночь с 6 на 7 октября) по 22 октября (день) 2019 г. в г. Москва. Автоматизированная установка для регистрации двигательной активности мышей состояла из двух звукоизолированных вентилируемых камер внутренним размером 110×45×70 см каждая. Мыши содержались по одной особи в пластиковом прозрачном боксе размерами 16×16×40 см; в каждой камере размещалось по 8 боксов. В камерах поддерживалась постоянная температура 22–26 °С, обеспечивался искусственный 12-часовой световой режим (08.01 ч – 20.00 ч – яркий белый свет, 20.01 ч – 08.00 ч – слабый красный свет) и свободный доступ к воде и пище.

Равномерность освещения достигалась за счет светодиодных лент со светодиодами SMD 3528. Дневной свет представлял собой освещение с цветовой температурой 3200 К (теплый белый свет). Освещенность, измеренная в месте нахождения мыши, составляла около 100 Лк. Ночное освещение обеспечивалось светодиодными лампами 900 К (красный свет). Освещенность, измеренная в месте нахождения мыши, – около 15 Лк. Для измерения освещенности использовали люксметр Smart Sensor AR823. Известно, что мыши наименее чувствительны к красной части спектра и освещенность менее 20 Лк не нарушает их цикл «сон–бодрствование» [Zhang et al., 2017].

Светодиодные ленты и вентиляторы работали от сети постоянного тока 12 В. Для видеорегистрации двигательной активности использовались четыре веб-камеры A4Tech PK333E (со встроенной инфракрасной подсветкой), каждая из которых обеспечивала одновременную видеорегистрацию активности четырех мышей в четырех квадрантах поля зрения видеокамеры. В каждом квадранте каждую секунду программа анализа производила количественную оценку отношения доли изменившихся и неизменившихся пикселей и усредняла эти данные за 10 с [Manolov et al., 2016]. Затем эти данные записывались в файл индивидуально для каждой мыши.

Геофизические данные для анализа

В качестве геофизических показателей были выбраны 1-минутные значения горизонтальной X -компоненты вектора ГМП (ВОХХ) по данным геомагнитной станции «Борок» ($58^{\circ}04'$ с.ш., $38^{\circ}14'$ в.д.), как расположенной на наименьшем расстоянии от пункта проведения измерений (г. Москва – $55^{\circ}45'$ с.ш., $37^{\circ}37'$ в.д.). Данные заимствованы из сети INTERMAGNET (International Real-time Magnetic Observatory Network, http://ottawa.intermagnet.org/Welcom_e.php). Выбор X -компоненты объяснялся следующим: в исследуемом частотном диапазоне она распространяется на значительные расстояния без искажений. Ранее нами было определено, что в спокойное время данные по станции «Борок» совпадают с данными по станции «Киев» [Зенченко и др., 2014].

Геомагнитная обстановка в течение всего периода измерений была спокойной ($K_p < 4$), геомагнитных бурь не наблюдалось.

Методы анализа

Фильтрация. Поскольку в данной работе нас интересовала возможная синхронизация колебаний с периодами от 10 до 120 мин (0.14–1.67 мГц), то для исключения суточных вариаций, трендов и низкочастотных составляющих к биологическим и геомагнитным временным рядам предварительно была применена процедура фильтрации полосовым фильтром Блэкмана–Харриса. Конкретные параметры фильтра (нижняя f_1 и верхняя f_2 частоты среза (от частоты Найквиста) и длина фильтра l_f) указаны далее для каждого результата.

Методы оценки сходства. Поскольку, как было сказано ранее, операция усреднения данных по группе может приводить к значительному снижению выраженности эффекта вплоть до его исчезновения, в данном исследовании нами были применены как среднегрупповой, так и индивидуальный подходы.

Метод среднегруппового анализа. При среднегрупповом анализе сначала вычислялись усредненные за каждую минуту значения активности по всем 16 животным. Ряд общей длиной 23 278 точек был отфильтрован низкочастотным фильтром (см. выше), затем разделен на последовательные 12-часовые отрезки, соответствующие дневным и ночным интервалам наблюдений – всего 32 отрезка по 720 точек (16 дневных и 16 ночных). Для каждого 12-часового отрезка определена функция кросс-корреляции между биологическим и синхронным ему геофизическим отрезком временного ряда.

Метод индивидуального анализа. Индивидуальные временные ряды одномоментных значений активности каждого животного были преобразованы в 3-минутные, затем разделены на 12-часовые интервалы (по 240 точек каждый). Всего для каждого животного получено по 32 временных отрезка; в общей сложности по всей группе из 16 животных – 512 индивидуально временных интервалов. Для каждого из 12-часовых отрезков после вышеуказанной низкочастотной фильтрации были рассчитаны фурье-спектры временного ряда вариаций геомагнитного вектора и 16 индивидуальных биологических рядов активности.

Заключение о сходстве биологического и геомагнитного рядов отдельно для каждого животного на каждом из 12-часовых отрезков делалось на основе результатов корреляционного анализа их фурье-спектров. Для этого из каждого спектра были выделены интервалы с 5-й по 72-ю гармонику (периоды от 10 до 144 мин – 0.12–1.67 мГц), спектры нормированы на максимальное встречающееся на данном отрезке спектра значение мощности, исключен линейный тренд для предотвращения избыточного вклада больших периодов, рассчитаны коэффициенты корреляции Спирмена r (непараметрический метод) для синхронных временных интервалов и оценен уровень статистической значимости корреляции (p).

Представление результатов при индивидуальном анализе. Для максимального удобства представления больших массивов результатов полученные значения коэффициентов корреляции r были преобразованы к виду индексов:

$$K = -\text{sign} r \cdot \lg p. \quad (1)$$

Такое представление удобнее для анализа больших массивов или таблиц результатов, чем традиционное, в виде пар значений r и p . Значение K однозначным образом зависит от r и p , содержит информацию и о знаке корреляции (его отражает функция $\text{sign} r$), и о степени связи двух рядов ($-\lg p$). Поскольку значение функции $-\lg p$ возрастает при возрастании уровня статистической значимости, то и значение K возрастает, а не снижается, как это происходит с величиной p .

Традиционно принятому первому уровню статистической значимости $p < 0.05$ соответствуют значения $|K| > 1.3$, поскольку $-\lg 0.05 = 1.3$. Аналогично уровню $p < 0.01$ соответствуют значения $|K| > 2$, уровню $p < 0.001$ соответствуют $|K| > 3$. Величины $|K| < 1.3$ означают отсутствие статистической связи между тестируемыми рядами.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среднегрупповой анализ

При анализе среднегрупповых значений активности животных ряды биологических и геофизических данных были предварительно отфильтрованы с параметрами фильтра $f_1 = 0.007$, $f_2 = 0.9995$, $l_f = 7500$. На рис. 1 представлены фурье-спектры двух рядов в диапазоне периодов 50–120 мин (0.14–0.33 мГц). Видно, что для 11 из 13 наиболее выраженных гармоник ряда активности животных (на рисунке указаны величины периодов) присутствуют соответствующие, точно совпадающие с ними по величине гармоники геофизического ряда.

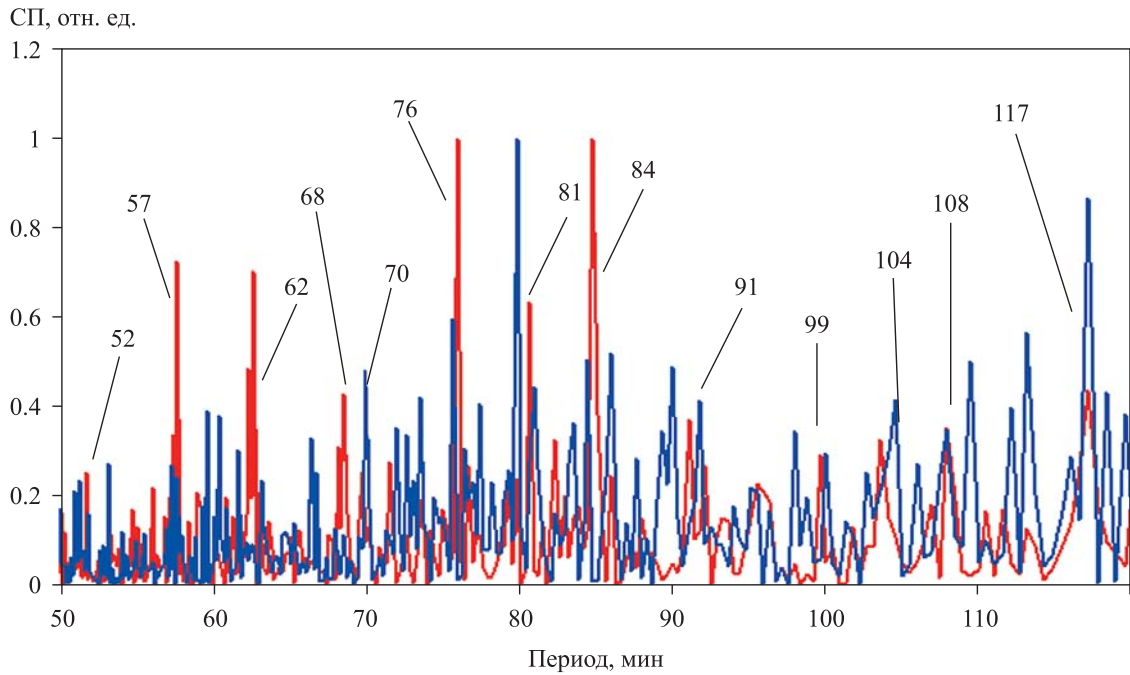


Рис. 1. Фурье-спектры среднегруппового биологического и геофизического 1-минутных временных рядов

Длина ряда – 23 278 точек, $f_1 = 0.007$, $f_2 = 0.9995$, $l_f = 7500$. Приведены значения спектральной мощности, нормированные на величину максимального значения

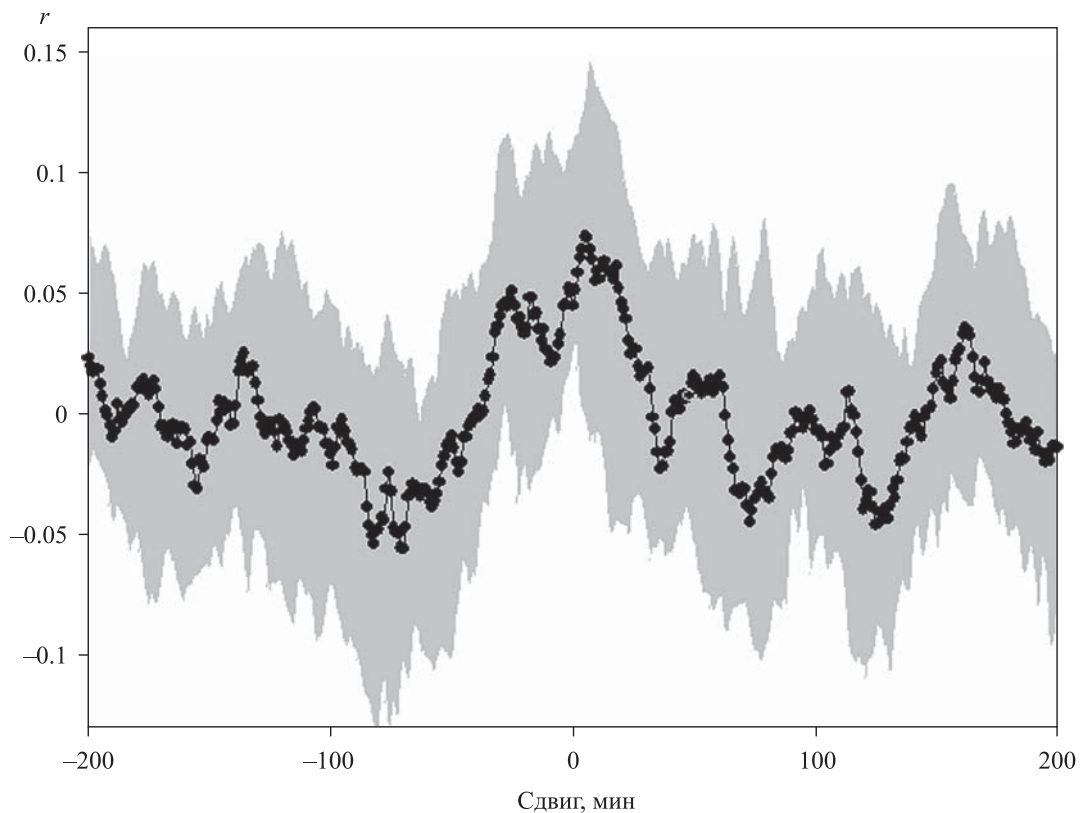


Рис. 2. Значение функции кросс-корреляции между среднегрупповым биологическим и геофизическим рядами, усредненное по 32 последовательным 12-часовым отрезкам

Параметры фильтрации те же, что на рис. 1

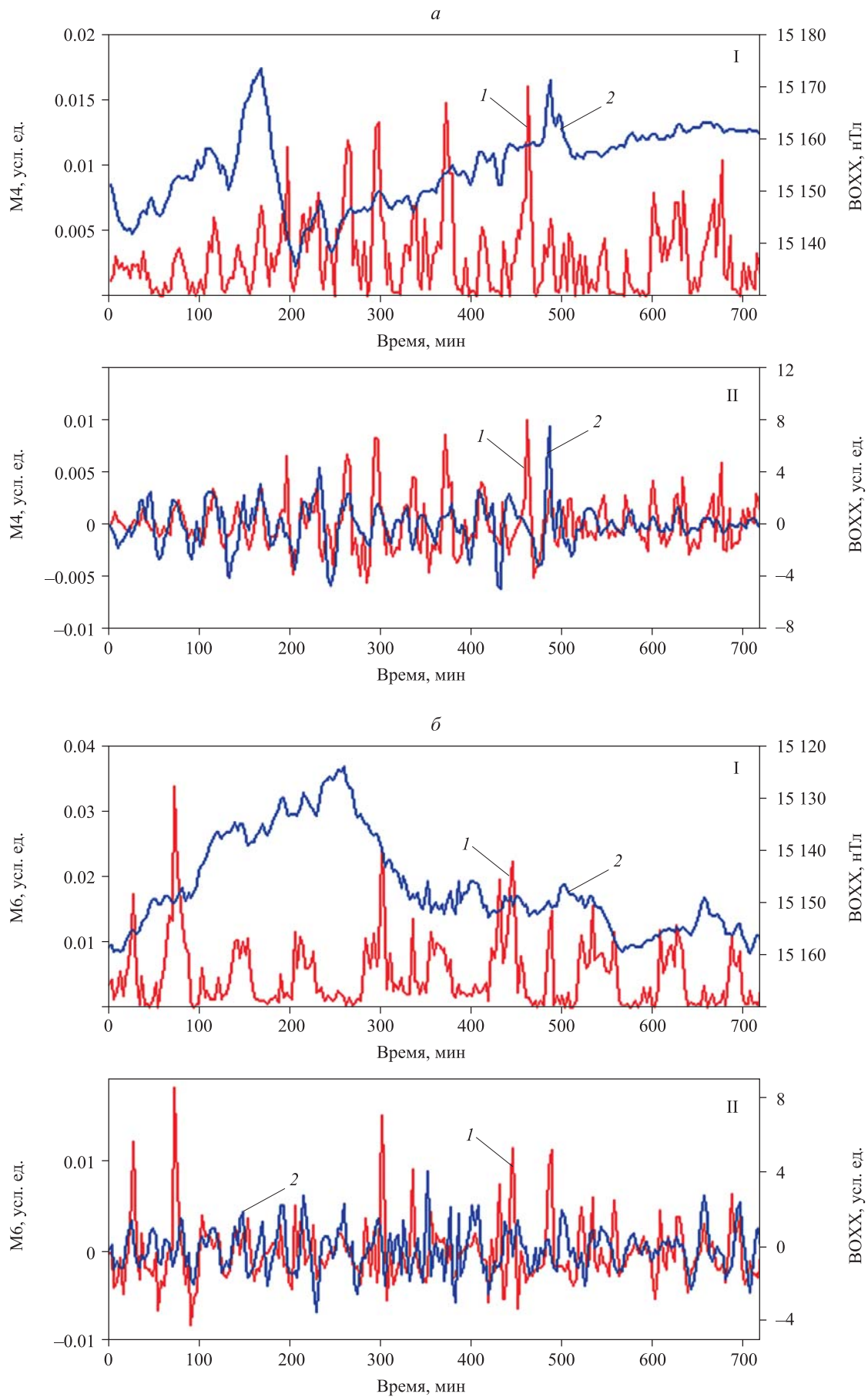


Рис. 3. Примеры рядов 3-минутных значений активности животных (1) и величины горизонтальной компоненты геомагнитного вектора ВОХХ (2): исходных (I) и после применения полосового фильтра (II)

а – 14.10.2019 г., ночь, мышь М4; *б* – 17.10.2019 г., день, мышь М6

Значения $K = -\text{sign } r \cdot \lg r$ оценки сходства спектров биологических рядов с вариациями X-компоненты вектора ГМП

Дата наблюдения	Время суток (1 – день, 2 – ночь)	Субъекты исследования (мыши)															
		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16
07.10.2019 г.	2	1.33	2.69	0.14	0.49	-0.19	-0.27	0.41	1.48	2.84	-1.09	0.83	0.97	-0.05	2.09	0.16	3.78
	1	0.74	0.96	1.11	-0.11	1.04	0.81	2.04	2.08	2.10	2.98	0.03	-1.42	-0.01	3.13	0.74	0.93
08.10.2019 г.	2	1.90	0.22	0.98	0.18	3.79	-0.22	3.41	0.29	2.84	0.01	0.28	1.70	-0.25	2.34	0.10	0.13
	1	0.29	0.04	0.08	-0.03	0.44	1.78	5.56	5.94	4.59	1.92	3.43	0.32	1.29	-0.13	0.24	5.59
09.10.2019 г.	2	0.41	3.86	5.78	1.57	0.09	2.52	-0.03	-0.12	0.38	1.59	0.59	0.32	-0.48	1.61	3.36	0.50
	1	0.68	1.43	1.00	0.86	0.05	1.03	0.36	0.65	0.16	-0.76	2.16	1.64	1.95	1.25	1.19	1.32
10.10.2019 г.	2	1.75	1.75	-1.53	0.03	1.45	2.26	0.09	0.29	0.04	1.66	1.94	0.92	-1.06	-0.18	-1.12	-0.64
	1	0.12	-0.08	0.95	0.10	1.57	0.12	0.14	0.41	0.55	0.61	2.53	1.11	0.30	-0.23	1.46	0.55
11.10.2019 г.	2	11.73	4.63	1.35	4.60	1.83	-0.27	3.03	0.19	0.85	0.89	0.84	0.29	0.83	-0.02	0.36	0.21
	1	0.10	1.27	3.37	2.69	0.62	3.17	2.28	3.28	12.95	1.11	0.91	1.11	3.60	1.69	0.43	14.42
12.10.2019 г.	2	1.81	1.08	0.96	-0.27	-0.24	2.51	1.31	2.31	5.06	-0.56	2.42	0.73	0.04	2.00	4.18	-0.06
	1	1.12	0.08	0.59	1.62	0.31	3.70	0.47	-0.41	0.13	-0.69	2.39	1.75	4.27	0.68	-0.19	1.99
13.10.2019 г.	2	1.00	-0.49	1.77	-0.23	1.67	-0.40	0.75	1.83	1.21	3.22	-0.49	2.89	0.93	0.25	0.79	1.80
	1	-0.38	-2.19	0.20	0.62	-0.17	0.05	0.33	-0.09	0.00	-0.94	-0.09	-0.38	0.08	-0.14	-0.23	-2.09
14.10.2019 г.	2	4.74	-0.23	-0.47	-0.18	0.21	-0.13	1.53	-0.04	0.99	0.38	0.23	-0.15	0.56	0.02	0.91	2.84
	1	0.70	-0.24	6.59	-0.29	0.43	0.16	0.51	-0.24	-0.42	0.75	0.15	0.21	-0.19	0.52	1.85	0.36
15.10.2019 г.	2	3.16	-0.03	2.70	0.02	0.07	6.15	1.40	1.52	4.20	0.24	1.51	3.21	1.56	1.63	5.22	1.36
	1	1.48	-0.34	1.26	1.70	2.99	0.44	0.19	0.88	7.06	1.13	-0.08	0.87	0.86	1.25	2.43	0.83
16.10.2019 г.	2	-0.16	-1.45	0.05	-0.77	-0.10	-0.01	-0.02	-0.96	-0.87	-0.82	-0.57	0.17	0.02	-1.40	-1.44	-0.65
	1	-0.14	0.75	0.55	-0.25	-0.18	0.28	-0.15	0.18	-2.15	0.37	-1.35	-0.05	0.60	0.57	-0.14	2.01
17.10.2019 г.	2	1.07	0.83	0.15	1.05	2.45	0.43	6.50	1.72	0.67	1.74	2.68	1.11	1.04	3.87	-0.11	6.01
	1	4.21	4.33	1.82	0.72	-0.13	5.32	-0.62	10.14	0.47	14.53	0.69	-0.02	0.97	8.32	7.91	0.08
18.10.2019 г.	2	0.31	0.94	4.70	4.26	0.89	4.81	0.83	3.03	-0.06	1.64	8.16	1.00	0.71	1.14	0.23	0.98
	1	0.33	2.01	4.71	1.66	5.39	5.32	0.26	0.22	0.68	0.04	-0.15	0.05	0.84	1.08	3.37	1.01
19.10.2019 г.	2	0.39	2.01	1.00	5.91	1.40	0.10	3.05	8.64	0.86	4.95	-0.21	2.08	0.04	4.03	0.35	-0.36
	1	1.19	-0.18	1.40	0.07	-1.06	-0.71	2.70	0.80	3.04	1.13	0.25	-0.13	5.76	-1.07	0.47	2.59
20.10.2019 г.	2	0.40	-0.03	-0.68	1.55	0.50	-0.15	0.44	-1.42	1.56	5.76	0.06	-0.44	10.67	-0.51	-0.42	-0.24
	1	0.35	0.16	1.70	5.99	4.21	-1.00	0.08	0.48	-1.43	1.84	0.58	0.86	0.15	-0.30	0.42	2.20
21.10.2019 г.	2	-0.08	6.11	3.53	-0.11	6.16	-0.19	1.42	-0.23	0.76	-0.10	-0.07	1.07	0.79	-0.14	-0.87	0.87
	1	-0.53	0.23	0.86	-0.33	1.64	-0.76	2.93	1.12	0.50	0.91	0.70	-0.55	0.34	-0.05	4.49	-0.16
22.10.2019 г.	2	-1.14	4.25	4.67	0.39	5.59	2.20	2.56	2.82	5.91	2.58	0.64	0.42	2.37	1.32	1.81	3.09
	1	-1.34	-0.38	-1.22	-0.10	1.55	-0.35	-0.10	-0.22	-0.29	0.07	0.26	0.03	0.02	0.19	-0.85	0.16

Примечания. Выделены значения, соответствующие уровню статистической значимости $p < 0.05$. Сходными считались спектры при $K > 2.5$

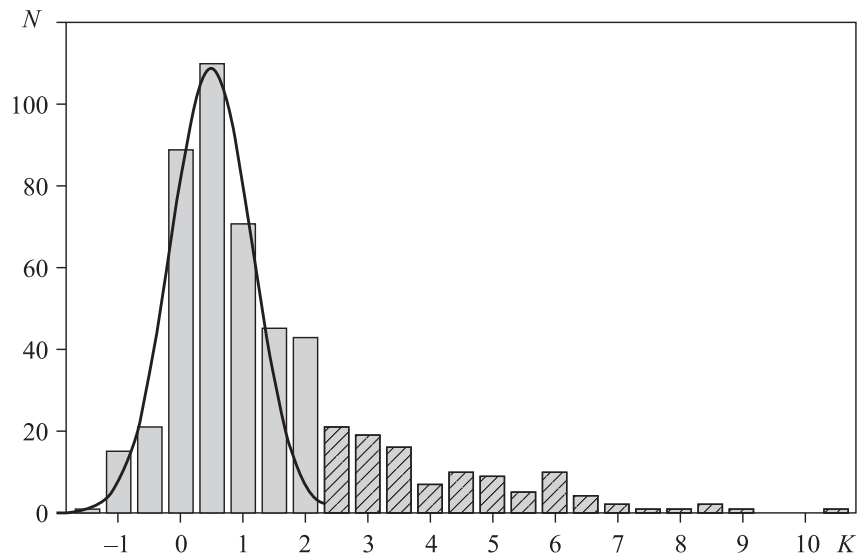


Рис. 4. Распределение коэффициентов $K = -\text{sign } r \cdot \lg p$ корреляций фурье-спектров индивидуальных биологических рядов с X-компонентой ГМП по всей выборке результатов

Сплошная линия – аппроксимация распределения функцией Гаусса

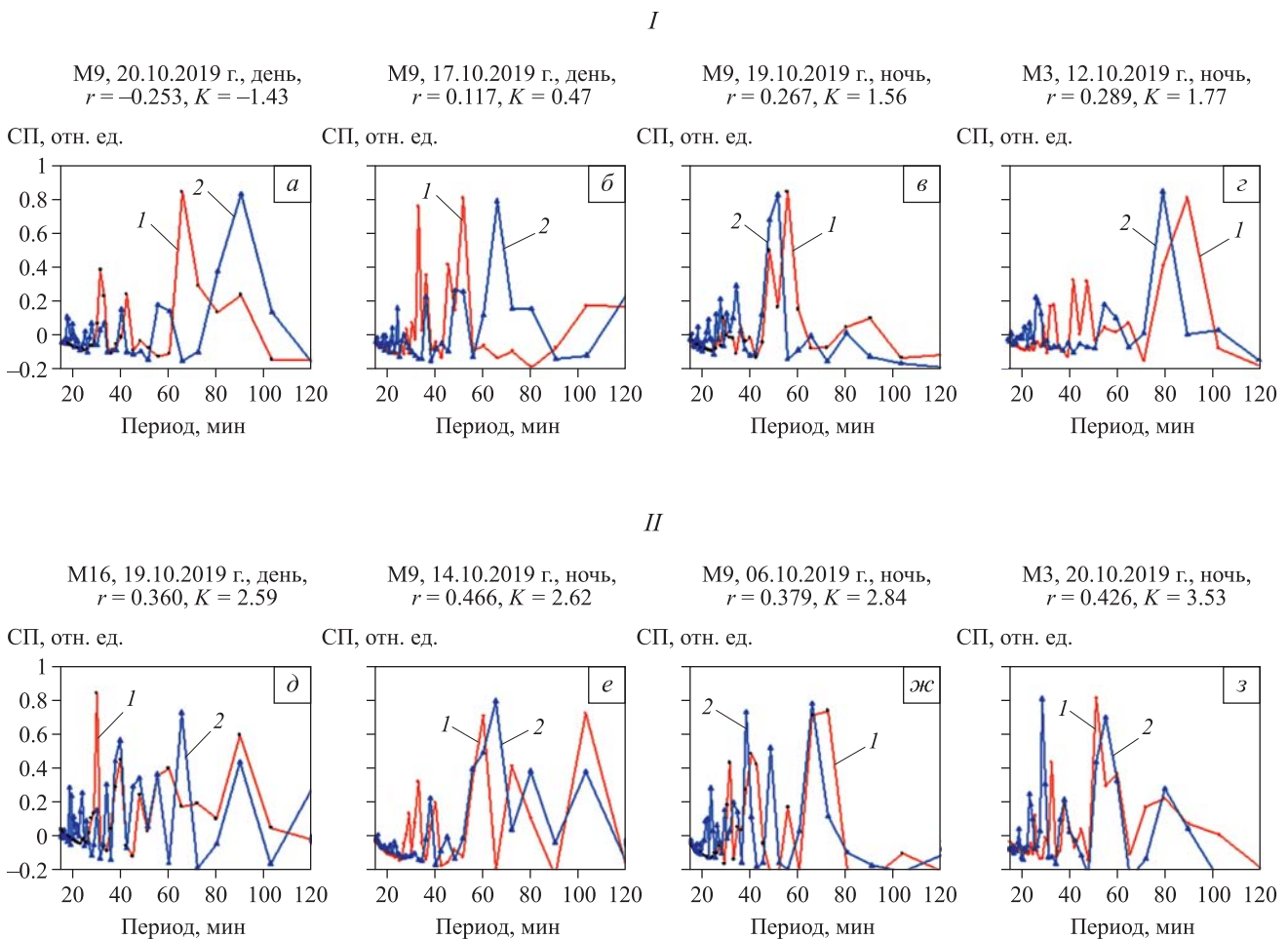


Рис. 5. Примеры спектров, признанных несходными согласно критерию $K < 2.5$ (*I*) и признанных сходными согласно критерию $K > 2.5$ (*II*)

I – биологический ряд; *2* – геофизический ряд. Спектры нормированы на максимальное значение

Непараметрический коэффициент корреляции Спирмена, вычисленный для биологического и геофизического рядов, оказался невысоким ($r = 0.053$), однако за счет очень большой длины ряда (23 278 точек) уровень статистической значимости составил $p < 10^{-15}$. Далее ряд был поделен на 12-часовые отрезки, и для каждого из 32 отрезков (дневные и ночные данные по 16 мышам) вычислялась кросс-корреляционная функция между значениями активности животных и величинами ВОХХ при временных сдвигах ± 200 мин. Распределение полученных значений коэффициентов корреляции по временному лагу в виде медианы, а также первого и третьего квартилей приведены на рис. 2. Видно, что абсолютный максимум распределения соответствует нулевому сдвигу между рядами.

Индивидуальный анализ

Первым этапом индивидуального анализа была разработка методики выявления эффекта.

На рис. 3 приведены примеры двух 12-часовых отрезков временных рядов активности определенного животного и синхронные им вариации горизонтальной компоненты ГМП (исходные и после применения полосового фильтра ($f_1 = 0.1, f_2 = 0.95, l_f = 79$)). Видно, что в исходном ряду суточная вариация вектора ГМП имеет большую амплитуду, которая практически скрывает колебания с более короткими периодами. После примененной процедуры фильтрации они становятся более выраженными.

Из представленных на рис. 3 данных видно также, какой характер имеет эффект синхронизации: и в геофизическом, и в биологическом временных рядах наблюдаются циклические колебания с периодами 40–100 мин (0.17–0.42 мГц), амплитуда и фаза которых варьируют. В данных примерах в 12-часовой отрезок наблюдения укладывается 17–20 циклов. Если бы наблюдаемые квазипериодические колебания были независимыми, а совпадение фаз на некотором участке случайным, то за выбранное время наблюдения происходила бы значительная рассинхронизация фаз колебаний. Однако на рис. 3, а, II и рис. 3, б, II видно, что совпадение экстремумов в двух рядах сохраняется на протяжении всего периода наблюдений, несмотря на вариабельность длины цикла.

Таким образом, по крайней мере в некоторых случаях в биологических рядах цикла «активность–покой» наблюдаются колебания близкие по частоте и фазе к аналогичным колебаниям в динамике вектора ГМП. Если предположить, что эта связь не случайна, то наиболее подходящим методом для оценки степени их сходства является метод оценки близости фурье-спектров данных рядов.

Разработка метода анализа сходства индивидуальных фурье-спектров

В таблице приведены результаты вычисления коэффициентов корреляции между 12-часовыми отрезками биологических (отдельно для каждого животного) и синхронных им геофизических рядов. Традиционно принятому уровню статистической значимости $p < 0.05$ ($K > 1.3$) в таблице удовлетворяют 172 значения из 512, т.е. 34 % (выделены полужирным шрифтом).

Однако в данном случае традиционный критерий $p < 0.05$ оказывается слишком слабым, поскольку нас интересует не вероятность случайного совпадения спектров, а их сходство. Для этого необходимо провести дополнительное исследование и определить границу значений уровня коэффициента корреляции, при которой спектры можно считать сходными.

Отрезки спектров, которые необходимо сравнить, можно рассматривать как векторы в пространстве (в данном случае размерности $n = 68$), а мерой их близости может служить их скалярное произведение, аналогичное линейному коэффициенту корреляции.

Распределение уровней значимости (K) коэффициентов корреляции, полученных в соответствии с формулой (1) для 512 временных отрезков, показано на рис. 4. Видно, что данное распределение смещено относительно нуля (мода равна 0.5) и несимметрично. Если принять, что при случайном совпадении особенностей двух спектров распределение должно подчиняться нормальному закону (показано на рисунке сплошной линией), то наблюдаемые аномально большие значения (в данном случае при $K > 2.5$) могут рассматриваться как выходящие за границы случайного распределения.

На рис. 5, а приведены примеры спектров, оцененные как несходные, на рис. 5, б – как сходные согласно выбранной границе сходства – критерию $K > 2.5$ (что соответствует $r > 0.354$). Видно, что выбранный критерий достаточно строг. Он исключает как несходные не только случаи, в которых частоты основного пика (если он один) сильно различаются (см. рис. 5, а, б; $K = -1.43, K = 0.47$), но и такие случаи, когда частоты оказываются близкими, но не совпадают (рис. 5, в, г; $K = 1.56, K = 1.77$). Согласно критерию, в ситуации множественности высокоамплитудных пиков оказывается допустимым небольшое расхождение частот одного из них (рис. 5, д, е; $K = 2.59–2.62$).

Таким образом, примеры спектров, приведенные на рис. 5, подтверждают обоснованность значения K , выбранного в качестве граничного из распределения всех выборочных значений (см. рис. 4): спектры, для которых $K > 2.5$, действительно имеют близкие значения основных представленных периодов, а спектры со значением $K < 2.5$ различаются.

Этот критерий является намного более строгим, чем традиционный $p < 0.05$ ($K > 1.3$), и даже, чем $p < 0.01$ ($K > 2$). Однако в полученной выборке коэффициентов корреляции ему соответствует 18 % значений.

Таким образом, согласно критерию сходства фурье-спектров, разработанному нами на основе стандартных методов статистического, корреляционного и спектрального анализов, наблюдается значительное количество случаев, выходящее за границы случайного совпадения.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЭФФЕКТА СИНХРОНИЗАЦИИ

Особенности распределения по отдельным животным и дням наблюдений

На рис. 6 приведены результаты анализа данных таблицы по отдельным животным (см. рис. 6, а) и по времени наблюдения (см. рис. 6, б). Показано распределение числа случаев N , в которых фурье-спектры были

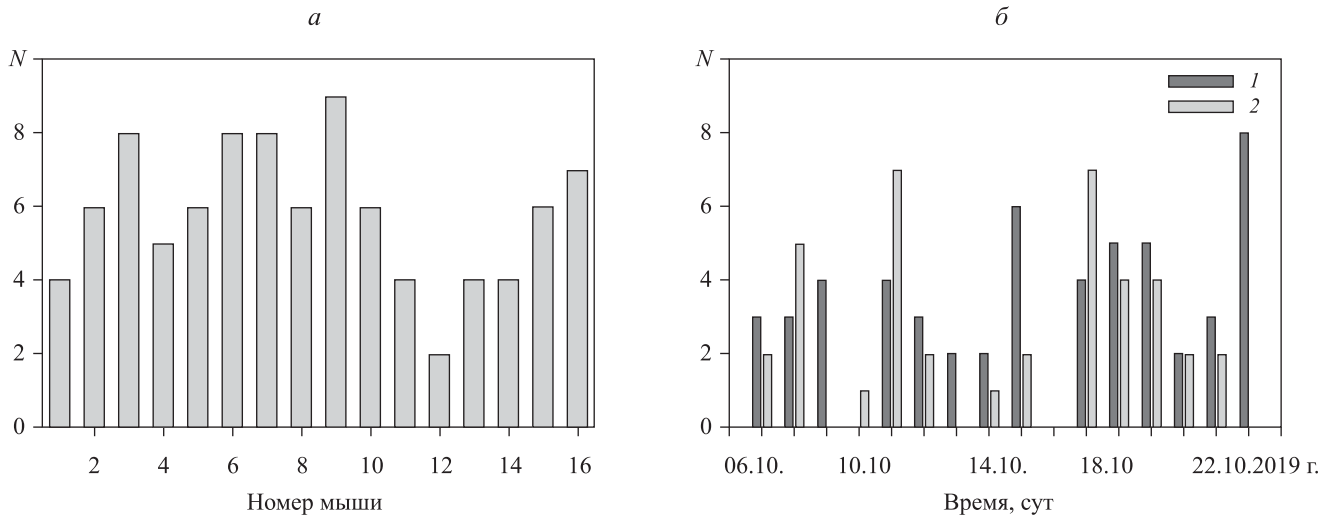


Рис. 6. Распределение числа случаев сходства ($K > 2.5$) между фурье-спектрами биологических и геомагнитных временных рядов для 16 мышей (а) и для каждого интервала наблюдений (б)

б. 1 – ночь; 2 – день

признаны сходными ($r > 0.354$ или соответственно $K > 2.5$). Из представленных на рис. 6, а данных видно, что для разных животных число таких случаев составляет от 2 до 9 (или от 6 до 28 %, в среднем по всей выборке животных – 18 % случаев). За исключением животного M12, для которого отмечено только два случая сходства спектров, для остальных нет объективных критериев, по которым их можно было бы разделить на «магниточувствительных» и «магнитонечувствительных». Если рассмотреть крайние значения данного распределения, то сходство спектров более чем в 20 % случаев (7–9 случаев) обнаружено для животных M3, M6, M7, M9 и M16, менее 15 % (2–4 случая) – для M1, M11–M14.

На рис. 6, б представлено распределение по дням наблюдений отдельно для дневных и ночных интервалов. Для дневных интервалов отмечено 39 совпадений (в сумме по всем животным), для ночных – 54.

Количество случаев значительно варьирует по суткам – от полного отсутствия совпадений (16 октября) до 9–11 случаев в сутки, что составляет 28–34 % (11 октября или 17–19 октября). Для выявления причин этих различий необходимы дополнительные исследования.

Сравнение особенностей дневных и ночных интервалов показывает, что в течение четырех дней (8, 10, 11 и 17 октября) дневное значение числа совпадений превышало ночное, а в остальные дни, наоборот. Таким образом, наблюдается некоторая тенденция к повышению процента совпадений в ночное время, однако сравнение выборок полученных дневных и ночных значений числа совпадений оказывается неразличимым согласно непараметрическому критерию Вилкоксона ($r = 0.14$, $p > 0.05$). Для более точного ответа на вопрос о том, наблюдается ли преимущественное совпадение спектров в ночное время по сравнению с дневным, необходимо увеличение выборки числа животных и интервалов анализа, что является задачей будущих исследований.

Особенности распределения по частотам спектра

Для объяснения причин обнаруженного эффекта сходства биологических и геомагнитных периодов можно предложить два механизма.

1. В геофизических и биологических рядах независимо присутствует определенная эндогенная ритмика с постоянным набором характерных периодов. Корреляция между рядами регистрируется в интервалы времени, когда величины этих внутренних периодов оказываются близкими, при этом причинно-следственная связь может полностью отсутствовать.

2. Биологический ритм подстраивается под колебания, присутствующие в данный момент в геомагнитном поле, при этом в каждый отдельный момент времени может наблюдаться преобладание разных частот.

Чтобы выяснить, какой из предложенных механизмов более вероятен, был проведен анализ особенностей спектров для различных выборок экспериментальных животных. На рис. 7, а показаны суммарные спектры временных рядов ВОХХ (отдельно для дневных и ночных отрезков в период эксперимента), на рис. 7, б–г – суммарные спектры для следующих выборок: б – все 16 животных; в – пять животных (M3, M6, M7, M9 и M16), для которых наблюдалась наибольшая частота сходства; г – пять животных (M1, M11–M14), для которых наблюдалась наименьшая частота сходства.

Видно, что спектры дневных и ночных отрезков ВОХХ (см. рис. 7, а) существенно различаются: если в дневные интервалы доминирует период 45–48 мин (0.35–0.37 мГц) и присутствуют (с меньшей амплитудой) периоды 65 и 80 мин (0.21–0.26 мГц), то в ночное время максимум частоты встречаемости сдвигается к периодам 65 и 80 мин (0.26 и 0.21 мГц соответственно), период 45 мин (0.37 мГц) практически исчезает, а периоду 72 мин (0.23 мГц) соответствует локальный минимум как в дневном, так и в ночном спектре.

Распределения амплитуд в спектрах биологических рядов выглядят практически одинаково как в дневные

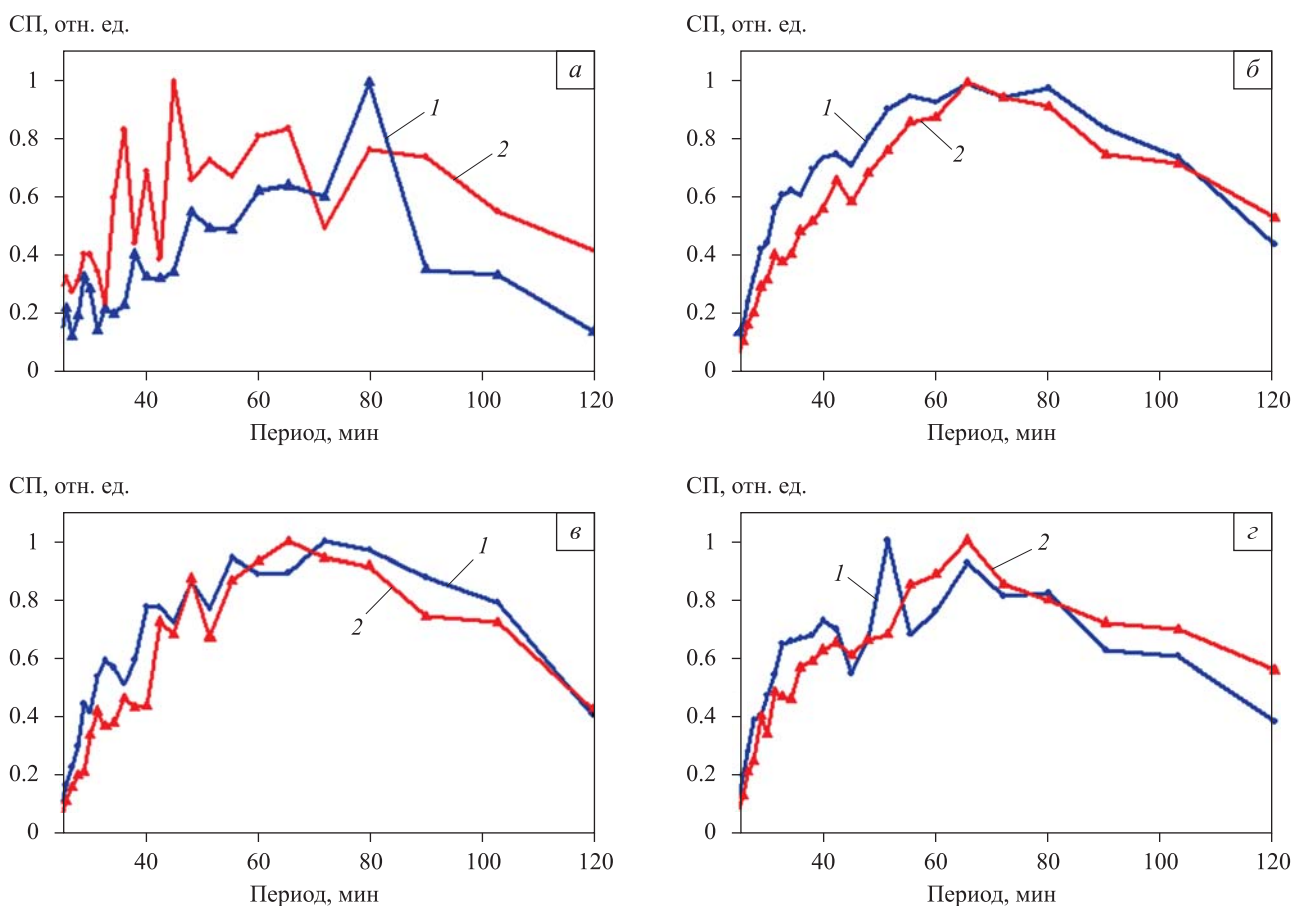


Рис. 7. Суммарные спектры исследуемых временных геофизического и биологических рядов отдельно для ночных (1) и для дневных (2) интервалов наблюдений

а – ВОХХ; *б* – все животные; *в* – 5 животных с наибольшей частотой схождения; *г* – 5 животных с наименьшей частотой схождения

и ночные часы внутри каждой из трех выборок, так и для разных выборок. Отчетливо выраженных экстремумов нет. Этот факт свидетельствует в пользу предположения, что устойчивых (монокроматических) эндогенных частот в ритмике исследуемого биологического параметра не наблюдается.

В то же время анализ индивидуальных особенностей распределения частот в спектрах биологических рядов показывает, что в ряде случаев все-таки наблюдается изменение особенностей ритмики в зависимости от времени суток, и эти изменения аналогичны особенностям, наблюдаемым в геофизических рядах. Так, на рис. 8 показано частотно-временное распределение представленных периодов последовательно для 16 ночных (см. рис. 8, *а*) и дневных (см. рис. 8, *б*) интервалов наблюдений рядов ВОХХ и реакций животных МЗ и М5. Каждая горизонтальная строка отображает спектр определенного дня, интенсивность периодов отражена интенсивностью красного цвета.

Из сравнения представленных на рис. 8 данных видно, что наибольшая частота максимальных по интенсивности периодов в биологических рядах в дневное время соответствует 60 мин (0.28 мГц), а в ночное – 80 мин (0.21 мГц). Эти интервалы на рисунке ограничены вертикальными линиями. Такое поведение спектральной ритмики позволяет предположить,

что усредненные спектры, приведенные на рис. 7, не в полной мере отражают особенности биологической ритмики и для окончательного выбора в пользу какой-либо из сформулированных выше гипотез материала пока недостаточно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данном исследовании были поставлены и решены следующие задачи.

1. На основе традиционных методов статистического и корреляционного анализа разработана методика для выявления эффекта синхронизации вариаций вектора ГМП и временных рядов двигательной активности лабораторных мышей, который у этих животных во многом определяется циклом «активность–покой».

2. Показано, что совпадение спектров на 12-часовых отрезках временного ряда встречается во много раз чаще, чем это возможно при случайном совпадении, т.е. у мышей для цикла «активность–покой» наблюдается эффект частотной подстройки биологической ритмики под колебания, присутствующие в геомагнитном спектре.

3. Произведена первичная оценка характеристик эффекта, а именно, особенностей его распределения по отдельным животным, дням наблюдения, определенным частотам спектра.

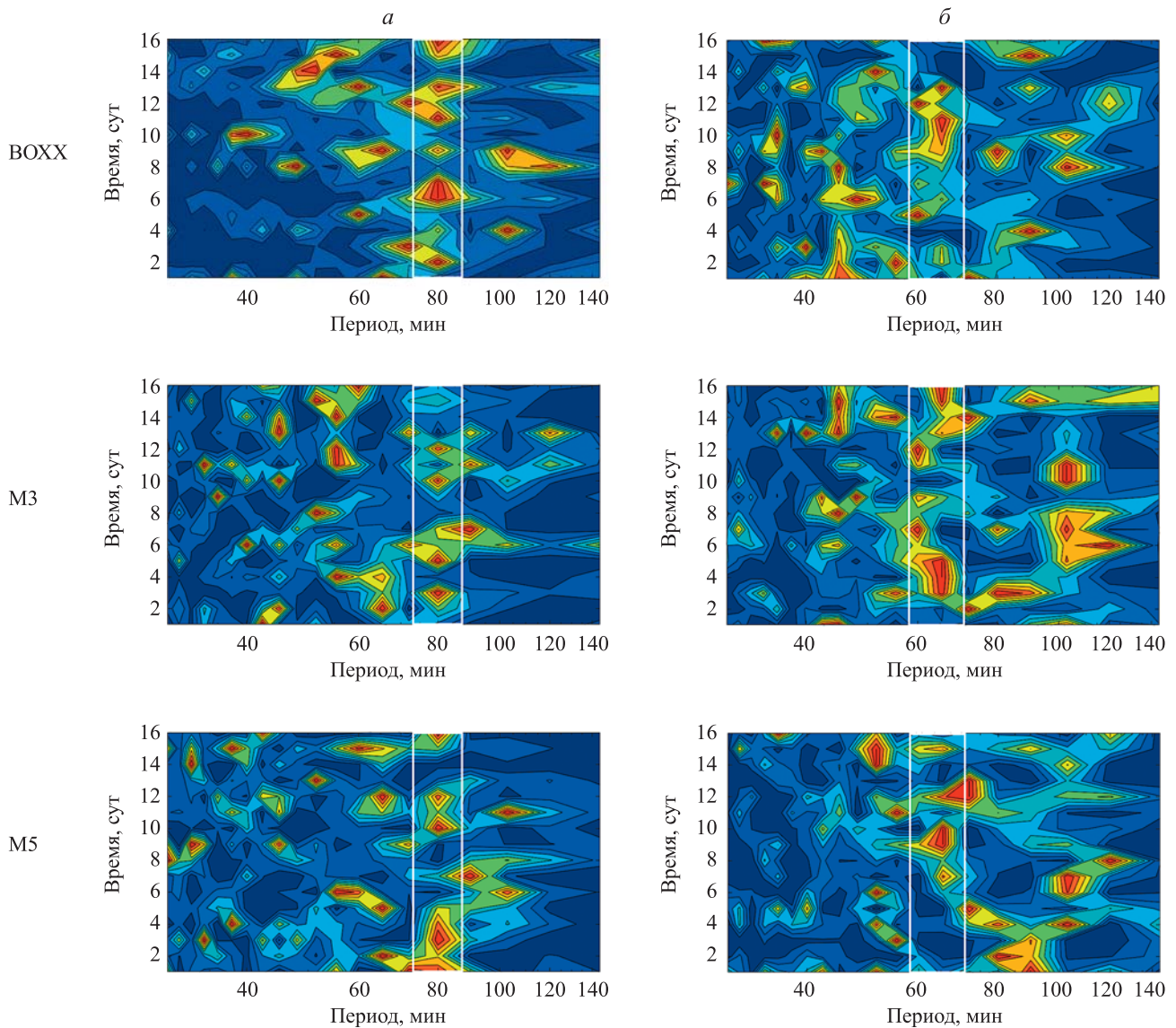


Рис. 8. Спектры последовательных 16 ночных (а) и дневных (б) отрезков временных рядов
Пояснения см. в тексте

Было обнаружено, что распределение уровней коэффициентов корреляции, рассчитанных для 512 временных отрезков биологических и геомагнитных рядов, сильно несимметрично. Примерно 18 % anomalously high values exceed the boundaries of a random distribution, which corresponds to cases of significant proximity of compared spectra.

Распределение таких случаев сходства спектров по отдельным животным и по дням наблюдений не дает оснований для разделения группы экспериментальных животных на «магниточувствительных» и «магнитонечувствительных», поскольку число случаев сходства изменяется плавно от 2 до 9 для разных животных. Аналогичным свойством обладал эффект синхронизации ритма сердца с вариациями геомагнитного поля в работах [Alabdulgade et al., 2015; Timofejeva et al., 2017]: участвовавших в исследовании волонтеров невозможно было разделить на определенные группы

«устойчиво магниточувствительных» или «устойчиво магнитонечувствительных» лиц.

Было обнаружено, что количество случаев сходства сильно варьирует в разные сутки с небольшим преобладанием числа случаев в ночные интервалы времени. На настоящий момент в литературе не обнаружено данных о симметрии или асимметрии распределения чувствительности в разное время суток, однако этот вопрос крайне важен для понимания механизма эффекта. Используемая нами в работе база данных, возможно, просто недостаточно объемна для точного установления таких различий.

Также было показано, что в разных «индивидуально временных» отрезках синхронизация обнаруживается при разных значениях основных периодов колебаний. Этот результат свидетельствует в пользу предположения о подстройке биологического ритма под вариации ритма геофизического. Следовательно, выявленная связь между изменениями активности животных и

вариациями ГМП определяется не просто случайным совпадением периодов, характерных для этих изучаемых параметров. Этот вывод согласуется с результатами, полученными ранее при исследовании особенностей синхронизации как сердечного ритма человека с вариациями ГМП [Зенченко и др., 2013, 2014], так и физиологических ритмов животных в диапазоне периодов 10–120 мин (0.14–1.67 мГц) у разных особей, даже находившихся на значительном удалении друг от друга [Dzailova et al., 2019; Диатроптов и др., 2020а, б].

Однако для утверждения, что именно колебания магнитного поля, а не связанные с их формированием другие физические факторы влияют на ритмику активности животных и, следовательно, на режим «активность–покой» необходимы дальнейшие экспериментальные исследования. Сложность проведения таких исследований имеет две причины.

1. Вероятно, механизм рецепции магнитного поля у организмов настроен именно на регистрацию крайне слабых вариаций магнитных полей, по амплитуде сопоставимых с колебаниями ГМП. О возможности клеток организма реагировать на сверхслабые магнитные поля при дистантных межклеточных взаимодействиях указывалось и ранее [Казначеев и др., 1981]. Следовательно, применяемые более интенсивные искусственно генерируемые сигналы могут не восприниматься организмом.

2. Пассивное магнитное экранирование не обеспечивает полного устранения вариаций ГМП в исследуемом сверхнизкочастотном диапазоне. В случае наличия у организма высокочувствительного механизма магнитной рецепции, даже значительное снижение амплитуды сигнала не всегда вызывает соответствующее снижение отклика в ритмике режима «активность–покой», так как мы наблюдаем именно феномен синхронизации, а не прямое активирующее/угнетающее влияние геомагнитных пульсаций.

ВЫВОДЫ

1. Существование эффекта синхронизации в геофизическом и в биологическом временных рядах показывает, что степень чувствительности различных животных изменяется плавно и варьирует во времени. Для более точного определения распространенности эффекта в популяции и во времени необходимо увеличение экспериментальной выборки и длительности наблюдений.

2. В некоторых случаях при среднегрупповом и индивидуальном анализе существует эффект синхронизации в геофизическом и в биологическом временных рядах: наблюдаются колебания близкие по частоте и фазе к аналогичным колебаниям в динамике вектора геомагнитного поля с периодами 40–100 мин (0.17–0.42 мГц), амплитуда и фаза которых варьируют; при этом распределение полученных значений коэффициентов корреляции по временному лагу в виде медианы показывает, что максимум соответствует нулевому сдвигу между рядами.

3. Спектры дневных и ночных отрезков ВОХХ отличаются: если в дневные интервалы доминирует период 45–48 мин (0.35–0.37 мГц) и присутствуют (с меньшей амплитудой) периоды 65 и 80 мин (0.21–0.26 мГц), то в ночное время максимум частоты встречаемости сдвигается к периодам 65 и 80 мин (0.26 и 0.21 мГц

соответственно), а в период 45 мин (0.37 мГц) практически исчезает. Периоду 72 мин (0.23 мГц) соответствует локальный минимум как в дневном, так и в ночном спектре, при этом распределение амплитуд в спектрах биологических рядов выглядит одинаково, а отчетливо выраженных экстремумов нет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено за счет средств государственного бюджета и частично при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-013-00603а).

БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты, представленные в этой статье, основаны на данных, собранных в магнитных обсерваториях. Мы благодарим поддерживающие обсерватории национальные институты и руководство международной сети INTERMAGNET за продвижение высоких стандартов практики магнитных обсерваторий (www.intermagnet.org).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бреус Т.К., Халберг Ф., Корнелиссен Ж. Влияние солнечной активности на физиологические ритмы биологических систем // *Биофизика*. 1995. Т. 40, № 4. С. 737–749.
- Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрукович А.А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: Физические проблемы и перспективы // *Успехи физ. наук*. 2016. Т. 186, № 5. С. 568–576.
- Владимирский Б.М., Темурияц Н.А. Влияние солнечной активности на биосферу–ноосферу / Под ред. Л.А. Блюменфельда, Н.Н. Моисеева. М.: Изд-во МНЭПУ, 2000. 374 с.
- Диатроптов М.Е., Диатроптова М.А., Алексанкина В.В., Косырева А.М. Внутрисуточные биоритмы динамики температуры тела мышей c57bl/6 в условиях постоянного освещения и при естественном фотопериоде // *Бюл. эксперим. биологии и медицины*. 2020а. Т. 169, № 3. С. 361–365.
- Диатроптов М.Е., Рutowская М.В., Суров А.В. Феномен синхронного приема пищи у обыкновенных скворцов (*sturnus vulgaris*) в условиях изоляции друг от друга // *Докл. РАН. Науки о жизни*. 2020б. Т. 492, № 1. С. 267–271.
- Зенченко Т.А., Медведева А.А., Хорсева Н.И., Бреус Т.К. Синхронизация показателей сердечного ритма человека и вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 0.5–3 мГц // *Геофизические процессы и биосфера*. 2013. № 4. С. 73–84.
- Зенченко Т.А., Йорданова М., Поскотинова Л.В., Медведева А.А., Аленикова А.Э., Хорсева Н.И. Синхронизации сердечного ритма человека с геомагнитными пульсациями РС5 на разных широтах // *Биофизика*. 2014. Т. 59, № 6. С. 1186–1194.
- Зенченко Т.А., Медведева А.А., Потолицина Н.Н., Паршукова О.И., Бойко Е.Р. Соотношение динамики минутных колебаний пульса и биохимических показателей крови здоровых лиц с геомагнитными пульсациями РС5-6 // *Биофизика*. 2015. Т. 60, № 2. С. 385–394.

- Казначеев В.П., Михайлова Л.П. Сверхслабые излучения в межклеточных взаимодействиях. Новосибирск: Наука, 1981. 145 с.
- Комаров Ф.И., Бреус Т.К., Рапопорт С.И., Ораевский В.Н., Гурфинкель Ю.И., Халберг Ф., Корнелиссен Ж. Медико-биологические эффекты солнечной активности // Вестн. Акад. мед. наук. 1994. № 11. С. 37–50.
- Корнелиссен Ж., Халберг Ф., Бреус Т.К., Ватанабе И., Соттерн Р.Б., Хаус Е., Клейтман Е., Вендт Х.В., Бинхам К. О проблеме происхождения биологической недели по данным о вариациях ритма частоты сердечных сокращений у людей в цикле солнечной активности // Биофизика. 1998. Т. 43, № 4. С. 666–669.
- Кузнецов А.Е. Синхронизация биосинтетической активности микробных продуцентов ритмики космофизического происхождения // Биофизика. 1992. Т. 37, № 4. С. 772–784.
- Побаченко С.В., Колесник А.Г., Бородин А.С., Калужин В.В. Сопряженность параметров энцефалограммы мозга человека и электромагнитных полей шумановского резонатора по данным мониторинговых исследований // Биофизика. 2006. Т. 51, № 3. С. 534–538. <https://doi.org/10.1134/S0006350906030225>
- Поскотинова Л.В., Зенченко Т.А., Кривоногова Е.В., Демин Д.Б. Методологические аспекты мониторинга индивидуальных реакций биоэлектрической активности головного мозга в условиях вариаций геомагнитного поля в Арктике // Вестн. Урал. мед. акад. науки. 2018. Т. 15, № 2. С. 316–323. <https://doi.org/10.22138/2500-0918-2018-15-2-316-323>
- Темурьянц Н.А., Владимирский Б.М., Тишкин О.Г. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире. Киев: Наук. думка, 1992. 187 с.
- Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1976. 367 с.
- Alabdulgade A., McCraty R., Atkinson M., Vainoras A., Berškienė K., Mauricienė V., Navickas Z., Šmidtaitė R., Landauskas M., Daunoravičienė A. Human heart rhythm sensitivity to Earth local magnetic field fluctuations // J. Vibroeng. 2015. V. 17. P. 3271–3278.
- Alabdulgader A., McCraty R., Atkinson M., Dobyns Y., Stolz V., Ragulskis M. Long-term study of heart rate variability responses to changes in the solar and geomagnetic environment // Sci. Rep. 2018. V. 8 (1). P. 2663. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-20932-x>
- Blum I.D., Zhu L., Moquin L., Kokoeva M.V., Gratton A., Giron B., Storch K.F. A highly tunable dopaminergic oscillator generates ultradian rhythms of behavioral arousal // Elife. 2014. V. 3. e05105. <https://doi.org/10.7554/eLife.05105>
- Bourguignon C., Storch K.F. Control of rest: Activity by a dopaminergic ultradian oscillator and the circadian clock // Front Neurol. 2017. V. 8. P. 614. <https://doi.org/10.3389/fneur.2017.00614>
- Cornelissen G., Halberg F., Breus T.K., Syutkina E.V., Bae-vskii R.M., Weydahl A., Watanabe Y., Otsuka K., Siegelova J., Fiser B., Bakken E.E. Non-photoc solar associations of heart rate variability and myocardial infarction // J. Atmosph. and Solar-Terr. Physics. 2002. V. 64. P. 707–728.
- Davis G.E., Lowell W.E. Solar cycles and their relationship to human disease and adaptability // Med. Hypotheses. 2006. V. 67. P. 447–461. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2006.03.011>
- Dorokhov V.B., Taranov A.O., Sakharov D.S., Gruzdeva S.S., Tkachenko O.N., Arseniev G.N., Ligun N.V., Sveshnikov D.S., Bakaeva Z.B., Dementienko V.V., Puchkova A.N. Effects of exposures to weak 2 Hz vs. 8 Hz electromagnetic fields on spectral characteristics of the electroencephalogram in afternoon nap // Biol. Rhythm Res. 2020. <https://doi.org/10.1080/09291016.2020.1857936>
- Dzalilova D.S., Diatroptova M.A., Mkhitarov V.A., Diatroptov M.E. Infradian rhythms of resistance to a dissociative anesthetic in wistar male rats under normal conditions and after surgical removal of the adrenal glands and testes // Bull. Exper. Biol. and Med. 2019. V. 166, N 3. С. 413–416.
- Gumarova L., Cornelissen G., Hillman D., Halberg F. Geographically selective assortment of cycles in pandemics: Meta-analysis of data collected by Chizhevsky // Epidemiol. Infect. 2013. V. 141 (10). P. 2173–2184. <https://doi.org/10.1017/S0950268812002804>
- Halberg F., Breus T.K., Cornelissen G., Bingham C., Hillman D.C., Rigatuso J., Delmore P., Bakken E. International Womb-to-Tomb Chronome Initiative Group: Chronobiology in space: Key-note of 37th ann. mtg. Japan Soc. for Aerospace and Environmental Medicine. Nagoya, Japan, November 8–9, 1991. Minneapolis, USA: Univ. of Minnesota, 1991. 21 p. (Medtronic Chronobiol. Sem. Ser. N 1. December 1991).
- Halberg F., Cornelissen G., Otsuka K., Watanabe Y. et al. Cross-spectrally coherent ~10.5- and 21-year biological and physical cycles, magnetic storms and myocardial infarctions // Neuroendocrinol. Lett. 2000. V. 21 (3). P. 233–258.
- Hayes D.P. Influenza pandemics, solar activity cycles, and vitamin D // Med. Hypotheses. 2010. V. 74 (5). P. 831–834. <https://doi.org/10.1016/j.mehy.2009.12.002>
- Manolov A.I., Dolgikh V.V., Ukraintseva Yu.V., Zavalko I.M., Revishchin A.V., Pavlova G.V., Pronina T.S., Ugryumov M.V., Dorokhov V.B., Koval'zon V.M. Changes in motor activity and the sleep-waking cycle in an MPTP model of Parkinson's disease in mice // Neurosci. and Behav. Physiol. 2016. V. 46, N 4. P. 467–471.
- McCraty R., Atkinson M., Stolz V., Alabdulgader A.A., Vainoras A., Ragulskis M. Synchronization of human autonomic nervous system rhythms with geomagnetic activity in human subjects // Inter. J. Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14 (7). P. 770. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070770>
- Ohayon M.M., Stolz V., Freund F.T., Milesi C., Sullivan S.S. The potential for impact of man-made super low and extremely low frequency electromagnetic fields on sleep // Sleep. Med. Rev. 2019. V. 47. P. 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2019.06.001>
- Qu J. Is sunspot activity a factor in influenza pandemics? // Rev. Med. Virol. 2016. Sep. V. 26 (5). P. 309–313. <https://doi.org/10.1002/rmv.1887>
- Saroka K.S., Vares D.E., Persinger M.A. Similar spectral power densities within the Schumann resonance and a large population of quantitative electroencephalographic profiles: Supportive evidence for Koenig and Pobachenko // PLoS One. 2016. V. 11. e0146595. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0146595>
- Schweiger H.-G., Berger S., Kretschmer H., Morler H., Halberg E., Sothorn R.B., Halberg F. Evidence of a circaseptan and circasemiseptan growth response to light/darkness cycle shifts in nucleated and enucleated Acetabularia cells respectively // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1986. N 83. P. 8619–8623.
- Timofejeva I., McCraty R., Atkinson M., Joffe R., Vainoras A., Alabdulgader A., Ragulskis M. Identification of a group's physiological synchronization with Earth's magnetic field // Inter. J Environ. Res. Public Health. 2017. V. 14 (9). P. 998. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5615535/>

- Vieira C.L.Z., Janot-Pacheco E., Lage C., Pacini A., Koutrakis P., Cury P.R., Shaodan H., Pereiral L.A., Saldiva P.H.N. Long-term association between the intensity of cosmic rays and mortality rates in the city of Sao Paulo // *Environ. Res. Let.* 2018. V. 13. 024009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaa27a>
- Wickramasinghe N.C. Is the 2019 novel coronavirus related to a spike of cosmic rays? // *Adv. Genet.* 2020. V. 106. P. 119–122. <https://doi.org/10.1016/bs.adgen.2020.06.003>
- Zhang Z., Wang H.J., Wang D.R., Qu W.M., Huang Z.L. Red light at intensities above 10 Lx alters sleep-wake behavior in mice // *Light Sci. Appl.* 2017. V. 6. e16231. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.231>
- Zenchenko T.A., Breus T.K. The possible effect of space weather factors on various physiological systems of the human organism // *Atmosphere.* 2021. V. 12. P. 346. <https://doi.org/10.3390/atmos12030346>

Сведения об авторах

ДОРОХОВ Владимир Борисович – Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Россия, 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А. E-mail: vbdorokhov@mail.ru

АРСЕНЬЕВ Глеб Николаевич – Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Россия, 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А. E-mail: byron100z@gmail.com

САХАРОВ Дмитрий Сергеевич – Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Россия, 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А. E-mail: sakharovdm@yandex.ru

ТКАЧЕНКО Ольга Николаевна – Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Россия, 117485, г. Москва, ул. Бутлерова, д. 5А. E-mail: tkachenkoon@gmail.com

ДИАТРОПТОВ Михаил Евгеньевич – Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН. Россия, 119071, г. Москва, Ленинский просп., д. 33. E-mail: diatrom@inbox.ru

ЗЕНЧЕНКО Татьяна Александровна – Институт теоретической и экспериментальной биофизики РАН. Россия, 142290, Московская обл., г. Пушкино, ул. Институтская, д. 3; Институт космических исследований РАН. Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. E-mail: zench@mail.ru

SYNCHRONIZATION OF «ACTIVITY–REST» CYCLE INDICATORS IN MICE WITH GEOMAGNETIC FIELD VARIATIONS IN THE MILLIHERTZ FREQUENCY RANGE

© 2021 V.B. Dorokhov¹*, G.N. Arseniev¹, D.S. Sakharov¹, O.N. Tkachenko¹,
M.E. Diatropov², T.A. Zenchenko^{3,4}

¹ Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

² Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

³ Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences, Pushchino,
Moscow region, Russia

⁴ Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* e-mail: vbdorokhov@mail.ru

Abstract. The synchronization of the mice motor activity, which reflects the activity-rest cycle, with variations in the X-component of the geomagnetic field vector (BOXX) in the range of fluctuations from 10 to 120 minutes was studied. The indicator of motor activity was the percentage of pixels on the video recording that changed their intensity in 10 sec. The experiment was performed simultaneously in 16 males of the C57BL/6 line in October, 2019 in Moscow. The mice were kept single in a plastic box ($t = 22–26$ °C) under an artificial 12-hour light regime and free access to water and food. The analysis of the degree of similarity of the rhythm of biological and BOXX indicators processes was carried out for each animal by evaluating the degree of similarity of their Fourier spectra for each the day and night intervals. Analysis of the time series averaged over the group showed that almost all harmonics in the interval of 50–120 min correspond to equal harmonics of the BOXX. The cross-correlation function of two series has a statistically significant absolute maximum with a zero time lag between the series. On average, 18 % of individual segments showed synchronization between the spectra of «activity–rest» cycle and BOXX. This result indicates the adjustment of the biological rhythm for the variations of the geophysical rhythm, which is similar effect of adjusting the rhythms of heart and brain human activity to an external rhythm generator – the geomagnetic field.

Keywords: biological rhythms, magnetic sensitivity, oscillation synchronization.

About the authors

DOROKHOV Vladimir Borisovich – Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences. Russia, 117485, Moscow, Butlerova st., 5A. E-mail: vbdorokhov@mail.ru

ARSENIEV Gleb Nikolaevich – Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences. Russia, 117485, Moscow, Butlerova st., 5A. E-mail: byron100z@gmail.com

SAKHAROV Dmitry Sergeevich – Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences. Russia, 117485, Moscow, Butlerova st., 5A. E-mail: sakharovdm@yandex.ru

TKACHENKO Olga Nikolaevna – Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Sciences. Russia, 117485, Moscow, Butlerova st., 5A. E-mail: tkachenkoon@gmail.com

DIATROPTOV Mikhail Evgenievich – Severtsov Institute of Ecology and Evolution, Russian Academy of Sciences. Russia, 119071, Moscow, Leninsky av., 33. E-mail: diatrom@inbox.ru

ZENCHENKO Tatiana Alexandrovna – Institute of Theoretical and Experimental Biophysics, Russian Academy of Sciences. Russia, 142290, Moscow region, Pushchino, Institutskaya st., 3; Space Research Institute, Russian Academy of Sciences. Russia, 117997, Moscow, Profsoyuznaya st., 84/32. E-mail: zench@mail.ru

Cite this article as: Dorokhov V.B., Arseniev G.N., Sakharov D.S., Tkachenko O.N., Diatropov M.E., Zenchenko T.A. Synchronization of «activity–rest» cycle indicators in mice with geomagnetic field variations in the millihertz frequency range, *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2021, vol. 20, no. 3, pp. 76–90 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2021.3-5>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2021, vol. 57, iss. 10. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>