

УДК 612.82-014.426-073.97:550.38

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РЕКУРРЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ

© 2014 г. И. Е. Кануников, Б. В. Киселев

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

Проблема влияния магнитного поля Земли на функциональное состояние человека имеет богатую феноменологию, но вопрос о закономерностях такого воздействия остается открытым [1, 2]. Одним из объективных методов изучения этой проблемы является исследование влияния геомагнитного поля на электроэнцефалограмму (ЭЭГ) человека.

Наша предыдущая работа [3] была посвящена изучению влияния изменений геомагнитного поля на показатели пространственной синхронизации ЭЭГ. На основании анализа результатов лонгитюдных экспериментов было показано, что изменения геомагнитного поля достоверно положительно коррелируют со значениями показателей пространственной синхронизации ЭЭГ височных отведений правого полушария.

В ряде современных исследований [12, 13, 17, 23] было показано, что в основе генеза ЭЭГ лежит низкоразмерный хаотический источник и, таким образом, ЭЭГ является нелинейным процессом. Принимая во внимание тот факт, что взаимосвязь между характеристиками геомагнитного поля и показателями ЭЭГ также имеет нелинейный характер, мы обратились к современному нелинейному методу, основанному на количественной оценке рекуррентных диаграмм, разработанному Zbilut & Weber [26]. Этот метод становится весьма популярным в последние годы. Его важное преимущество состоит в возможности использования для анализа коротких временных рядов с шумом [14]. К тому же метод позволяет анализировать активность системы независимо от числа и динамической природы индивидуальных источников [16]. В последние годы этот метод стал успешно использоваться для анализа ЭЭГ и вызванных потенциалов [11, 15, 22].

Есть основания полагать, что применение по отношению к ЭЭГ методов рекуррентного анализа выводит исследование временных рядов на новый уровень. В литературе имеются сообщения о возможности предсказывать эпилептические припадки на основании рекуррентного анализа ЭЭГ [24], данные о выделении в ЭЭГ ответов на одиночные стимулы [6]. В последние годы появились работы Carrubba et al. [9], показавшие, что только рекуррентный количественный анализ позволил выявить в ЭЭГ реакции, вызванные воздействием слабого магнитного поля. Эти факты дали нам основание для использования данного весьма чувствительного нелинейного метода с целью выявления реакций ЭЭГ на изменения геомагнитного поля.

Методы исследования

Методы регистрации ЭЭГ

В исследовании приняли участие 10 практически здоровых испыту-

В многодневных исследованиях изучено влияние изменений геомагнитного поля на электроэнцефалограмму (ЭЭГ) 10 испытуемых. Взаимосвязь между характеристиками геомагнитного поля и ЭЭГ носит нелинейный характер, поэтому использован метод количественного анализа рекуррентных диаграмм. ЭЭГ регистрировалась в 16 отведениях левого и правого полушарий в трех фоновых условиях. Для каждого отведения высчитывалось 9 рекуррентных показателей. Вычислялись коэффициенты корреляции каждого из них с глобальными и локальными коэффициентами геомагнитной активности. Так как каждый рекуррентный показатель обнаружил значимую индивидуальную динамику на протяжении серии, данные по всем показателям были усреднены. Все рекуррентные показатели ЭЭГ обнаружили достоверную корреляцию с геомагнитной активностью, причем количество корреляций в левом полушарии оказалось значимо больше. Установлено значимое превышение числа корреляций в левой височной области по сравнению с правой. Вывод: геомагнитное поле оказывает наиболее выраженное влияние на височные области.

Ключевые слова:

электроэнцефалограмма, геомагнитное поле, количественный анализ рекуррентных диаграмм

емых (6 мужчин и 4 женщины) в возрасте от 20 до 64 лет. Электроэнцефалограмма регистрировалась в 16 отведениях в соответствии с международной системой отведений 10–20 во фронтальных (Fp1, Fp2, F3, F4, F7, F8), височных (T3, T4, T5, T6), центральных (C3, C4), теменных (P3, P4) и затылочных (O1, O2) отведениях левого и правого полушарий (рис. 1). Запись осуществлялась в трех фоновых условиях: спокойное листание книги (открытые глаза), спокойное разглядывание картины (открытые глаза), счет в уме числа капель, моделируемых с помощью фоностимулятора (закрытые глаза). С нашей точки зрения, такая простая активность уравнивала состояние разных испытуемых в большей степени, чем стандартная процедура, не позволяющая контролировать их внутреннее состояние. Длина записи в каждом из трех фоновых состояний была равна приблизительно одной минуте. ЭЭГ квантовалась с частотой 250 отсчетов в секунду. Постоянная времени составляла 0,3 с, а верхняя частота среза равнялась 30 Гц. Перед обработкой данных все записи ЭЭГ фильтровались с тем, чтобы исключить из анализа различные артефакты вне мозгового происхождения. Каждый испытуемый принял участие в 20–50 экспериментах, которые проводились в период времени от полугода до года.

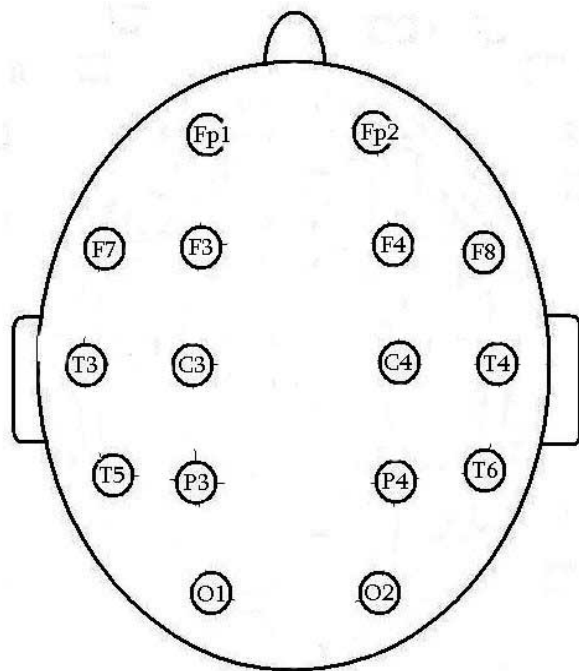


Рис. 1. Схема расположения электродов для регистрации электроэнцефалограммы, соответствующая международной системе 10–20

Методы анализа данных

Качественный анализ

В 1987 году Eckmann et al. [10] предложили способ отображения m -мерной фазовой траектории состояний $\vec{x}(t)$ на двумерную квадратную двоичную матрицу размером $N \times N$, в которой 1 (черная точка) соответствует повторению состояния при некотором

времени i в некоторое другое время j , а обе координатные оси являются осями времени. В результате мы получаем *рекуррентную диаграмму* (recurrence plot, RP):

$$\mathbf{R}_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad \vec{x} \in \mathbf{R}^m, \quad i, j = 1 \dots N$$

$$\mathbf{R}_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad \vec{x} \in \mathbf{R}^m, \quad i, j = 1 \dots N, \quad (1)$$

x_i , ε_i — размер окрестности точки \vec{x} в момент i , $\|\cdot\|$ — расстояние и $\Theta(\cdot)$ — функция Хэвисайда.

Поскольку $\mathbf{R}_{i,i} = 1$ ($i = 1 \dots N$) по определению, то рекуррентная диаграмма всегда содержит черную диагональную линию — *линию идентичности* (line of identity, LOI), под углом $\pi/4$ к осям координат. Произвольно взятая рекуррентная точка (i, j) не несет какой-либо полезной информации о состояниях во времена i и j . Только вся совокупность рекуррентных точек позволяет восстановить свойства системы.

Непрактично и, как правило, невозможно обнаружить полную рекуррентность в смысле $\vec{x}_i \equiv \vec{x}_j$ (состояние динамической, а особенно хаотической системы не повторяется полностью эквивалентно начальному состоянию, а подходит к нему сколь угодно близко). Таким образом, рекуррентность определяется как достаточная близость состояния \vec{x}_j состоянию \vec{x}_i . Иными словами, рекуррентными являются состояния \vec{x}_j , попадающие в m -мерную окрестность с радиусом ε_i и центром в \vec{x}_i . Эти точки \vec{x}_j называются *рекуррентными точками* (recurrence points). В выражении (1) сказанное описывается функцией Хэвисайда Θ и ее параметром ε_i . Рис. 2 иллюстрирует получение рекуррентных точек.

Изначальное предназначение рекуррентных диаграмм — зрительный анализ траекторий в фазовых пространствах высоких размерностей; внешний вид диаграммы может дать представление об эволюции этих траекторий во времени. Можно выделить два основных класса структур: *топология* (typology), соответствующая крупномасштабным структурам, и *текстура* (texture), соответствующая мелкомасштабным структурам.

Топология дает общее представление о характере процесса; выделяют четыре различных класса (рис. 3):

Количественный анализ

Zbilut, Webber [25, 26] разработали количественный анализ рекуррентных диаграмм (recurrence quantification analysis, RQA) для определения численных показателей рекуррентной диаграммы. Они предложили меры, использующие плотность рекуррентных точек и диагональные структуры диаграммы: показатель подобия (RR), детерминизм (DET), максимальную длину диагональных линий (L), энтропию (ENTR), тренд (TREND). Несколько позже Marwan [14] предложил меры, основанные на горизонтальных (вертикальных) структурах рекуррентных диаграмм: замирание (LAM) и показатель задержки (TT). В работе В. Б. Киселева [4] была предложена мера (CLEAN) оценки баланса между стохастической и детерминисткой составляющей.

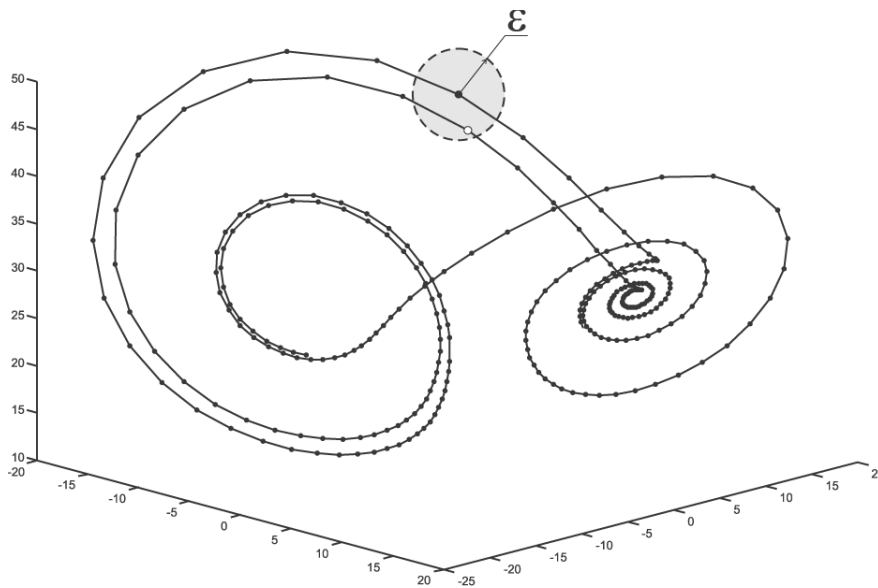


Рис. 2. Получение рекуррентной диаграммы на примере фрагмента траектории системы Лоренца ($\gamma = 28$, $\sigma = 10$, $b = 8/3$, три компоненты, длина временного ряда 200 отсчетов). Белая точка рекуррентна точке в центре шара радиусом ϵ

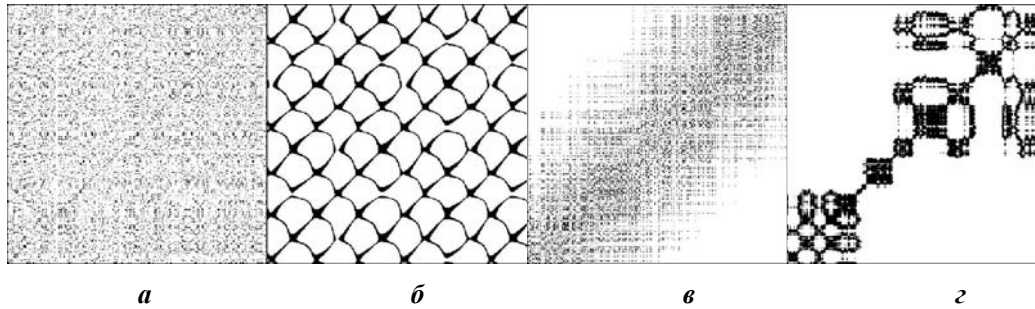


Рис. 3. Характерные топологии рекуррентных диаграмм: а — однородная (нормально распределенный шум); б — периодическая (генератор Ван дер Поля); в — дрейф (отображение Икеды с наложенной линейно растущей последовательностью); г — контрастные области или полосы (обобщенное броуновское движение)

Как правило, для вычисления мер используются рекуррентные диаграммы с постоянным значением порога ϵ .

Мера рекуррентности (recurrence rate, RR)

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\epsilon} \quad (2)$$

показывает плотность рекуррентных точек, просто подсчитывая их, включая линию идентичности. В пределе

$$P = \lim \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\epsilon}$$

данная мера показывает вероятность нахождения рекуррентной точки в рекуррентной диаграмме (вероятность повторения состояния).

Процессы со стохастическим поведением могут порождать очень короткие диагонали либо вообще не порождать их, в то время как детерминистские процессы дают длинные диагонали и малое количество отдельных рекуррентных точек. Таким образом, отношение рекуррентных точек, составляющих диагональные структуры, к общему количеству рекуррентных точек

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^{\epsilon}(l)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\epsilon}} \quad (3)$$

называется мерой детерминизма (determinism, DET) или предсказуемости системы. Следует отметить, что эта мера не имеет значения реального детерминизма процесса. Пороговое значение минимальной длины l_{\min} исключает диагональные линии, образованные тангенциальным движением траектории в фазовом пространстве. Очевидно, что $l_{\min} = 1 \Rightarrow DET = 1$.

Диагональные структуры показывают время, в течение которого участок траектории подходит достаточно близко к другому участку траектории. Таким образом, эти линии позволяют судить о расхождении элементов траектории. Средняя длина диагональных линий

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^{\epsilon}(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^{\epsilon}(l)} \quad (4)$$

это среднее время, в течение которого два участка

траектории проходят близко один к другому, и может рассматриваться как среднее время предсказуемости. Также находит применение максимальная длина диагональных структур либо ее инверсия — дивергенция (divergence, DIV):

$$L_{\max} = \max(\{l_i; i = 1 \dots N_l\}), \quad DIV = \frac{1}{L_{\max}}. \quad (5)$$

Установлено, что длины диагональных линий соотносятся с наибольшим положительным показателем Ляпунова, если он существует для рассматриваемой системы. Разными авторами были предложены методы оценки максимального положительного показателя Ляпунова с использованием длин диагональных линий.

Мера энтропии (entropy, ENTR) соотносится с энтропией Шеннона (Shannon) частотного распределения длин диагональных линий

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l),$$

$$p(l) = \frac{P^E(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^E(l)}, \quad (6)$$

и отражает сложность детерминистской составляющей в системе.

Следующая мера представляет собой, по сути, отношение между DET и RR и может быть вычислена из частотного распределения длин диагональных линий:

$$RATIO = N^2 \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^E(l)}{\left(\sum_{l=l_{\min}}^N l P^E(l)\right)^2} \quad (7)$$

Эвристическое изучение физиологических систем показало, что эта мера может быть использована для распознавания фазовых переходов в случаях, когда RR уменьшается, а DET остается постоянной.

Мера замирания (laminarity, LAM)

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^E(v)}{\sum_{i,j} R_{i,j}^{m,E}} \quad (8)$$

определяется отношением количества рекуррентных точек, образующих горизонтальные линии к общему количеству рекуррентных точек. LAM характеризует наличие состояний замирания системы (т. е. когда движение системы по фазовой траектории останавливается или продвигается очень медленно).

Средняя длина горизонтальных структур

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^E(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P^E(v)} \quad (9)$$

называется показателем задержки (trapping time, TT) и характеризует среднее время, которое система может провести в более-менее неизменном состоянии.

Влияние стохастической составляющей процесса приводит к появлению на диаграмме отдельно стоящих точек и очень коротких диагональных линий. В основном стохастические процессы, как уже упоминалось выше, вообще могут не порождать длинных диагоналей (например, обобщенное броуновское движение), а если таковые и обнаруживаются, то их появление носит случайный характер.

Сказанное позволяет нам ввести меру отношения количества точек, формирующих диагональные линии длиной $l < l_{\min}$, к количеству точек, формирующих диагональные линии $l \geq l_{\min}$

$$CLEAN = \frac{\sum_{l=1}^{l_{\min}-1} l P^E(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^E(l)} \quad (10)$$

называется мерой чистоты (cleanness, CLEAN) и показывает влияние стохастической составляющей процесса. Очевидно, что преобладание последней приведет к росту значения CLEAN.

Для каждого испытуемого для каждого из 16 отведений для трех фоновых условий высчитывалось 9 рекуррентных показателей (RR, DET, L, DIV, ENTR, RATIO, LAM, TT, CLEAN). Затем вычислялся коэффициент корреляции (по Пирсону) этих показателей с геомагнитной активностью. С этой целью рассчитывался коэффициент корреляции между двумя рядами показателей: значения того или иного показателя ЭЭГ в дни опыта и значения геомагнитной активности в эти же дни.

В результате каждый эксперимент давал около 500 значений рекуррентных показателей ($9 \times 16 \times 3$). Использовались два типа геомагнитных индексов: планетарный Ар-индекс и локальный К-индекс, который брался из базы данных сайта финской обсерватории (Sudancula). Значения коэффициента корреляции с индексом геомагнитной активности усреднялись по трем фоновым условиям. Значимым полагался уровень, соответствующий $p < 0,05$.

Результаты

На первоначальном этапе анализа высчитывались коэффициенты корреляции каждого из 9 рекуррентных показателей ЭЭГ с планетарными и локальными индексами геомагнитной активности и отбирались значимые корреляции. Оказалось, что все рекуррентные показатели ЭЭГ обнаружили достоверные корреляции с индексом геомагнитной активности. Для всех 10 испытуемых общее число значимых взаимосвязей с планетарным индексом составило 271, а с локальным индексом — 347. Принимая во внимание, что локальный индекс оказался более чувствительным по отношению к рекуррентным показателям, в дальнейших вычислениях использовали только его. Максимальное число значимых корреляций между рекуррентными показателями и геомагнитной активностью равнялось 44 (для показателя DIV), а минимальное 32 (для показателя TT).

В табл. 1 представлены данные о количестве статистически значимых коэффициентов корреляции между рекуррентными показателями ЭЭГ и локальным индексом геомагнитной активности для каждого из 10 испытуемых. Отметим тот факт, что общее число индивидуальных корреляций (по всем 9 показателям) варьировало от 14 до 57.

Таблица 1
Количество значимых корреляций рекуррентных показателей электроэнцефалограммы с локальным К-индексом геомагнитной активности (данные по отведениям усреднены)

Испы- туемый	RR	DET	L	DIV	ENTER	RATIO	LAM	TT	CLEAN	Сумма
1	5	4	5	7	5	7	4	5	4	46
2	2	1	4	4	3	1	1	3	0	19
3	11	4	2	8	7	7	9	1	8	57
4	2	2	1	2	1	1	3	0	2	14
5	1	4	3	3	3	4	2	4	4	28
6	4	5	7	9	8	3	3	5	3	47
7	1	5	2	5	3	4	8	3	5	36
8	4	8	5	1	5	2	6	5	7	43
9	1	5	5	4	6	7	4	5	5	42
10	3	1	1	1	1	3	1	1	2	14
Сумма	34	39	35	44	42	39	41	32	40	346

Следующий интересный результат состоял в том, что все рекуррентные показатели характеризовались большим числом корреляций для ЭЭГ левого полушария по сравнению с правым полушарием. Однако статистически значимые различия имели место только для показателя DET ($p = 0,023$). При этом в целом при усреднении всех 9 рекуррентных показателей различия между левым и правым полушарием оказались высокосignификантными ($p = 0,0014$).

Для оценки динамики рекуррентных показателей в ходе серии в работе были вычислены их значения для перекрывающихся отрезков ЭЭГ, длина каждого из которых составляла 10 000 точек со сдвигом 5 000. Полученные результаты для показателя RR в отведениях P3 и P4 представлены в табл. 2. Как оказалось, показатель имеет достаточно высокую изменчивость. Аналогичные результаты получены для других показателей. Исходя из того, что каждый показатель имеет свою динамику, относительно независимую от других показателей, мы сочли, что для получения более устойчивых результатов имеет смысл усреднить данные по всем 9 рекуррентным показателям.

Таблица 2
Динамика значений рекуррентного показателя RR в отведениях P3 и P4 для 6 последовательных отрезков электроэнцефалограммы по 10 000 точек со сдвигом 5 000 точек

Отведение	Э п о х а а н а л и з а					
	1	2	3	4	5	6
P3	0,25	0,20	0,30	0,26	0,26	0,38
P4	0,25	0,24	0,22	0,30	0,32	0,33

На заключительной стадии анализа рассчитывались межполушарные различия коэффициентов корреляции для каждой пары симметричных отведений левого и правого полушарий (табл. 3). За исключением пары отведений C3 и C4, где количество корреляций в правом полушарии оказалось выше по сравнению с левым, и пары T5–T6, где их число оказалось равным, во всех других парах отведений количество корреляций в левом полушарии было выше, чем в правом. Однако статистически значимые различия ($p = 0,035$) наблюдались только между височными отведениями T3 и T4.

Таблица 3
Количество значимых корреляций, усредненных по 9 рекуррентным показателям электроэнцефалограммы, в различных отведениях с локальным К-индексом геомагнитной активности (данные усреднены по 10 испытуемым)

	О т в е д е н и е															
	C3	C4	F3	F4	F7	F8	Fp1	Fp2	O1	O2	P3	P4	T3	T4	T5	T6
Коли- чество корре- ляций	24	34	16	14	22	12	37	19	32	21	10	6	35	12	26	26

Исследование изменений в пределах классических ритмов ЭЭГ (α , β , θ) в ответ на изменения геомагнитного поля не обнаружило значимых корреляций с К-индексом. В то же время, как показали представленные выше результаты, исходный нефилтрованный ЭЭГ-сигнал обнаружил такие взаимосвязи.

Обсуждение результатов

Факт существования большого числа значимых корреляций между различными рекуррентными ЭЭГ-показателями и индексом геомагнитной активности представляется весьма важным. Он говорит о том, что нелинейные рекуррентные показатели ЭЭГ достаточно чувствительны к изменениям геомагнитного поля. В исследовании Sagruba et al. [9] также показано, что магнитосенсорные вызванные потенциалы (ВП) в ответ на воздействие электромагнитного поля характеризуются нелинейной взаимосвязью с параметрами магнитных стимулов. Это подтверждает, что влияние геомагнитного поля на электрическую активность мозга подчиняется нелинейным законам. Тот факт, что локальный К-индекс геомагнитной активности оказался более тесно связанным с рекуррентными ЭЭГ-показателями по сравнению с планетарным Ар-индексом, является свидетельством того, что локальный индекс более точно отражает состояние геомагнитного поля в Санкт-Петербурге, лежащем примерно на той же долготе, что и Финская обсерватория Соданкюля (Sodankyla).

Факт высоких межиндивидуальных различий в отношении количества значимых корреляций между различными рекуррентными показателями ЭЭГ и геомагнитной активностью, а также разной ролью отведений в этих корреляциях отражает наличие

индивидуальных различий в чувствительности мозга к изменениям геомагнитного поля.

Следует отметить, что испытуемые различаются и в отношении того, какие отведения значимо коррелируют с показателями геомагнитной активности. У 4 из 10 испытуемых коррелировали в основном показатели фронтальных и височных отведений, у 4 значимые корреляции наблюдались практически для всех отведений и у 2 испытуемых коррелировали либо фронтальные, либо височные отведения.

Подобные индивидуальные различия наблюдались в работе Carruba et al. [9]. В этом исследовании было показано, что индивидуальные различия в магнитосенсорных ВП были столь существенны, что в результате усреднения ответов по всем испытуемым групповые ВП не выявлялись.

В целом можно предположить, что существование индивидуальных различий отражает различия в порогах раздражения тех или иных кортикальных областей в ответ на слабые воздействия геомагнитного поля.

Следующий интересный результат касается значимой разницы между числом корреляций с рекуррентными ЭЭГ-показателями в левом и правом полушариях. Этот результат состоит в наличии большего числа корреляций с каждым из рекуррентных показателей ЭЭГ в левом полушарии по сравнению с правым и соответственно высокосignificant различии числа корреляций, усредненных по всем рекуррентным показателям ЭЭГ. Вопрос о механизмах, лежащих в основе подобных различий, остается открытым. Мы знаем, что правое полушарие тесно связано с адаптационными процессами. Так, например, В. П. Леутин и Е. И. Николаева [5] на основе многочисленных экспериментальных данных пришли к заключению, что активация правого полушария является решающим фактором, обеспечивающим адаптацию к экстремальным климатическим условиям.

В наших предыдущих экспериментах было показано, что в ответ на изменения геомагнитного поля правое полушарие активируется значимо сильнее по сравнению с левым. Эти результаты были основаны на анализе показателя пространственной синхронизации ЭЭГ. Было показано, что уровень пространственной синхронизации ЭЭГ в правом полушарии оказался значимо выше, чем в левом. Близкие данные о влиянии возмущений геомагнитного поля на кортикальные области правого полушария получены в целом ряде исследований [7, 8, 11, 18, 19].

Мы связываем этот результат со стрессорной реакцией, вызванной изменением геомагнитного поля. В настоящем исследовании более чувствительными к изменениям геомагнитного поля оказались рекуррентные показатели левого полушария, то есть чем больше изменяется геомагнитное поле, тем большие значения приобретают рекуррентные показатели в левом полушарии. Известно, что более высокие рекуррентные показатели соответствуют увеличению числа независимых источников и, таким образом, снижению пространственной синхронизации в левом

полушарии. Эта интерпретация хорошо согласуется с вышеизложенными данными.

Особо следует отметить тот факт, что в настоящем исследовании, как и в предыдущем [3], наиболее чувствительными к изменениям геомагнитного поля оказались височные отведения (Т3 и Т4). Близкие результаты получены в исследовании Saroka et al. [21], правда, в их исследовании увеличение геомагнитной активности сопровождалось повышением когерентности между двумя нижнелобными областями (Т5 и Т6). Babayev et al. [7] также сообщают о высокой активности правой височной области при геомагнитных бурях. Близкие результаты получены W. Randall & S. Randall [20].

Подводя итог проведенному исследованию, следует считать наиболее важным тот факт, что геомагнитное поле влияет в первую очередь на височную область. Этот результат подтверждается нашим предыдущим исследованием, а также рядом литературных данных. Вопрос о механизмах, лежащих в основе подобной взаимосвязи, остается открытым. Однако важным представляется и то, что медиальные образования височной доли входят в систему, регулирующую состояния активности организма, его аффективную сферу, и принимают большое участие в тех процессах, которые обеспечивают сохранение и активацию следов доходящих до организма раздражений.

Исследование выполнено за счет средств темплана СПбГУ 1.0.132.2010.

Список литературы

1. Агаджанян Н. А., Петрова П. Г. Человек в условиях Севера. М. : КРУК, 1996. 208 с.
2. Казначеев В. П. Современные аспекты адаптации. Новосибирск : Наука, 1980. 192 с.
3. Кануников И. Е., Белов Д. Р., Гетманенко О. В. Влияние геомагнитной активности на электроэнцефалограмму человека // Экология человека. 2010. № 6. С. 6–11.
4. Киселев В. Б. Определение стабильности траектории процесса в фазовом пространстве при помощи рекуррентного анализа // Научно-технический вестник СПбГУИТМО. 2007. № 40. С. 121–130.
5. Леутин В. П., Николаева Е. И. Психофизиологические механизмы адаптации: функциональная асимметрия мозга. Новосибирск : Наука СО, 1988. 192 с.
6. Andrade K. C., Wehrle R., Spoormaker V. I., Sämann P. G., Czigisch M. Statistical evaluation of recurrence quantification analysis applied on single trial evoked potential studies // Clinical Neurophysiology 2012. Vol. 123. P. 1523–1535.
7. Babayev E. S., Allahverdiyeva A. A. Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies // Advances in Space Research. 2007. N 40. P. 1941–1951.
8. Belisheva N. K., Popov A. N., Petukhova N. V., Pavlova L. P., Osipov K. S., Tkachenko S. W., Baranova T. I. Quantitative and qualitative evaluations of the effect of geomagnetic field variations on the functional state of the human brain // Biophysics. 1995. Vol. 40. P. 1007–1014.
9. Carruba S., Frilot C., Chesson A. L., Webber C. L., Zbilut J. P., Marino A. A. Magnetosensory evoked potentials:

consistent nonlinear phenomena // *Neurosci Res.* 2008. Vol. 60. P. 95–105.

10. Eckmann J.-P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems // *Europhysics Letters.* 1987. N 5. P. 973–977.

11. Healey F., Persinger M. A., Koren S. A. Enhanced hypnotic suggestibility following application of burst-firing magnetic fields over the right temporoparietal lobes: a replication // *International Journal of Neuroscience.* 1996. Vol. 87 (3–4). P. 201–207.

12. Krystal A. D., Greenside H. S., Weiner R. D., Gassert D. A comparison of EEG signal dynamics in waking after anesthesia induction and during electroconvulsive therapy seizures // *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1996. Vol. 99. P. 129–140.

13. Marino A. A., Nilsen E., Frilot II C. Consistent magnetic-field induced changes in brain activity detected by recurrence quantitation analysis // *Brain Res.* 2002. N 951. P. 301–310.

14. Marwan N. Encounters with neighbours-current development of concepts based on recurrence plots and their application. PhD thesis, Fakultät Mathematik Und Naturwissenschaften Universität Potsdam. 2003.

15. Marwan N., Meinke A. Extended recurrence plot analysis and its application to ERP data // *Int. J. Bifurcation Chaos.* 2004. N 14. P. 761–771.

16. Marwan N. M., Romano M., Kurths T. J. Recurrence plots for the analysis of complex systems // *Physics Reports.* 2007. Vol. 438. P. 237–329.

17. Micheloyannis S., Flitzanis N., Papanikolaou E., Bourkas M., Terzakis D., Arvanitis S., Stam C. J. Usefulness of non-linear EEG analysis // *Acta Neurol. Scand.* 1998. Vol. 97. P. 13–19.

18. Mulligan B. P., Hunter M. D., Persinger M. A. Effects of geomagnetic activity and atmospheric power variations on quantitative measures of brain activity: Replication of the Azerbaijani studies // *Advances in Space Research.* 2010. Vol. 45. P. 940–948.

19. Persinger M. A., Healey F. Experimental facilitation of the sensed presence: possible interactions between the hemispheres induced by complex magnetic fields // *The Journal of Nervous and Mental Diseases.* 2002. Vol. 190. P. 533–541.

20. Randall W., Randall S. The solar wind and hallucinations - a possible relation due to magnetic disturbances // *Bioelectromagnetism.* 1991. Vol. 12. P. 67–70.

21. Saroka K. S., Caswella J. M., Lapointea, Persinger M. A. Greater electroencephalographic coherence between left and right temporal lobe structures during increased geomagnetic activity // *Neurosci. Lett.* 2013 (in press).

22. Schinkel S., Marwan N., Kurths J. Brain signal analysis based on recurrences // *Journal of Physiology. Paris.* 2009. Vol. 103. P. 315–323.

23. Theiler J., Rapp P. E. Re-examination of the evidence for low-dimensional, nonlinear structure in the human electroencephalogram // *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1996. Vol. 98. P. 213–222.

24. Thomasson N., Hoepfner T. J., Webber Jr. C. L., Zbilut J. P. Recurrence quantification in epileptic EEGs // *Physics Letters A.* 2001. 279 (1–2). P. 94–101.

25. Webber Jr. C. L., Zbilut J. P. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies // *J. Appl. Physiol.* 1994. Vol. 76. P. 965–973.

26. Zbilut J. P., Webber Jr. C. L. Embeddings and delays

as derived from quantification of recurrence plots // *Physics Letters A.* 1992. Vol. 171. P. 199–203.

References

1. Agadzhanian N. A., Petrova P. G. *Chelovek v usloviyah Severa* [People in conditions of the North]. Moscow, 1996, 208 p.

2. Kaznacheev V. P. *Sovremennye aspekty adaptatsii* [Modern aspects of adaptation] Novosibirsk, 1980. 192 p.

3. Kanunikov I. E., Belov D. R., Getmanenko O. V. Influence of the geomagnetic activity on the human electroencephalogram. *Ekologiya cheloveka* [Human Ecology]. 2010, 6, pp. 6–11. [in Russian]

4. Kiselev V. B. *Opredelenie stabilnosti traektorii processa v fazovom prostranstve pri pomoshi rekurrentnogo analiza* [Determination of stability of process trajectory in phase space by means of the recurrent analysis]. Nauchno-technicheskii vestnik SPbSUITMO. [SPbSUITMO Scientific and Technical Bulletin]. 2007, 40, pp. 121–130. [in Russian]

5. Leutin V. P., Nikolaeva E. I. *Psichofiziologicheskie mekhanizmi adaptatsii: funkcionalnaya asimmetriya mozga* [Psychophysiological mechanisms of adaptation: Functional brain asymmetry]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1988, 192 p.

6. Andrade K. C., Wehrle R., Spormaker V. I., Sämann P. G., Czisch M. Statistical evaluation of recurrence quantification analysis applied on single trial evoked potential studies. *Clinical Neurophysiology*. 2012, 123, pp. 1523–1535.

7. Babayev E. S., Allahverdiyeva A. A. Effects of geomagnetic activity variations on the physiological and psychological state of functionally healthy humans: some results of Azerbaijani studies. *Advances in Space Research.* 2007, 40, pp. 1941–1951.

8. Belisheva N. K., Popov A. N., Petukhova N. V., Pavlova L. P., Osipov K. S., Tkachenko S. W., Baranova T. I. Quantitative and qualitative evaluations of the effect of geomagnetic field variations on the functional state of the human brain. *Biophysics.* 1995, 40, pp. 1007–1014.

9. Carrubba S., Frilot C., Chesson A. L., Webber C. L., Zbilut J. P., Marino A. A. Magnetosensory evoked potentials: consistent nonlinear phenomena. *Neurosci Res.* 2008, 60, pp. 95–105.

10. Eckmann J.-P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters.* 1987, 5, pp. 973–977.

11. Healey F., Persinger M. A., Koren S. A. Enhanced hypnotic suggestibility following application of burst-firing magnetic fields over the right temporoparietal lobes: a replication. *International Journal of Neuroscience.* 1996, 87 (3–4), pp. 201–207.

12. Krystal A. D., Greenside H. S., Weiner R. D., Gassert D. A comparison of EEG signal dynamics in waking after anesthesia induction and during electroconvulsive therapy seizures. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1996, 99, pp. 129–140.

13. Marino A. A., Nilsen E., Frilot II. C. Consistent magnetic-field induced changes in brain activity detected by recurrence quantitation analysis. *Brain Res.* 2002, 951, pp. 301–310.

14. Marwan N. Encounters with neighbours-current development of concepts based on recurrence plots and their application. PhD thesis, Fakultät Mathematik Und Naturwissenschaften Universität Potsdam. 2003.

15. Marwan N., Meinke A. Extended recurrence plot analysis and its application to ERP data. *Int. J. Bifurcation Chaos.* 2004, 14, pp. 761–771.

16. Marwan N. M., Romano M., Kurths T. J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports*. 2007, 438, pp. 237-329.
17. Micheloyannis S., Flitzanis N., Papanikolaou E., Bourkas M., Terzakis D., Arvanitis S., Stam C. J. Usefulness of non-linear EEG analysis. *Acta Neurol. Scand.* 1998, 97, pp. 13-19.
18. Mulligan B. P., Hunter M. D., Persinger M. A. Effects of geomagnetic activity and atmospheric power variations on quantitative measures of brain activity: Replication of the Azerbaijani studies. *Advances in Space Research*. 2010, 45, pp. 940-948.
19. Persinger M. A., Healey F. Experimental facilitation of the sensed presence: possible interactions between the hemispheres induced by complex magnetic fields. *The Journal of Nervous and Mental Diseases*. 2002, 190, pp. 533-541.
20. Randall W., Randall S. The solar wind and hallucinations - a possible relation due to magnetic disturbances. *Bioelectromagnetism*. 1991, 12, pp. 67-70.
21. Saroka K. S., Caswella J. M., Lapointe, Persinger M. A. Greater electroencephalographic coherence between left and right temporal lobe structures during increased geomagnetic activity. *Neurosci. Lett.* 2013 (in press).
22. Schinkel S., Marwan N., Kurths J. Brain signal analysis based on recurrences. *Journal of Physiology*. Paris. 2009, 103, pp. 315-323.
23. Theiler J., Rapp P. E. Re-examination of the evidence for low-dimensional, nonlinear structure in the human electroencephalogram. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 1996, 98, pp. 213-222.
24. Thomasson N., Hoepfner T. J., Webber Jr. C. L., Zbilut J. P. Recurrence quantification in epileptic EEGs. *Physics Letters A*. 2001, 279 (1-2), pp. 94-101.
25. Webber Jr. C. L., Zbilut J. P. Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies. *J. Appl. Physiol.* 1994, 76, pp. 965-973.
26. Zbilut J. P., Webber Jr. C. L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A*. 1992, 171, pp. 199-203.

INFLUENCE OF THE GEOMAGNETIC FIELD ON RECURRENCE QUANTIFICATION EEG INDEXES

I. E. Kanunikov, B. V. Kiselev

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

The effect of changes of the geomagnetic field on human electroencephalograms (EEG) has been studied. Based on the fact that the relationship between the characteristics of the geomagnetic field and the EEG was not linear, the method of recurrence quantification analysis (RQA) was used. EEGs were recorded in 16 sites of the left and right hemispheres in three background states. Subjects (10 people) participated in the multi-day studies. 9 recurrence indexes (RR, DET, L, DIV, ENTR, RATIO, LAM, TT, CLEAN) were calculated for each of the 16 EEG sites. The correlation coefficients were calculated for each index with the global and local coefficients of geomagnetic activity. Since each recurrence index showed significant individual dynamics in the course of the series, the data for all 9 indexes were averaged. All EEG recurrent indexes showed a reliable correlation with the geomagnetic activity, and the number of correlations in the left hemisphere was significantly bigger than in the right one. A significant excess in the number of correlations in the left temporal area (T3) compared to the right one (T4) has been found. It has been concluded that the geomagnetic field had the most pronounced effect on the temporal lobes.

Keywords: electroencephalogram, geomagnetic field, recurrence quantification analysis

Контактная информация:

Кануников Игорь Евгеньевич — кандидат биологических наук, доцент биолого-почвенного факультета Санкт-Петербургского государственного университета

Адрес: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., д. 7/9

E-mail: igorkan@mail.ru