

И. Е. Кануников, Б. В. Киселев, В. Б. Киселев, Т. Ф. Шамаева

ВЛИЯНИЕ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ НА РЕКУРРЕНТНУЮ ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММЫ ЧЕЛОВЕКА

Введение

Результаты многих наблюдений показывают, что нервная система человека чувствительна к изменениям геомагнитной активности. Впервые на это обратил внимание А. Л. Чижевский, представив убедительный литературный материал о связи между солнечной активностью и частотой эпилептических припадков, смертностью от заболеваний нервной системы, числом самоубийств. В дальнейшем были получены многочисленные подтверждения этого вывода. Показано, в частности, что во время повышенной солнечной активности наблюдается снижение скорости реакции, интенсивности внимания и объема кратковременной памяти, увеличивается вероятность принятия неверных решений. Возникает вполне очевидный вопрос, влияет ли геомагнитная активность на электроэнцефалограмму (ЭЭГ) человека, которая является основным объективным показателем деятельности головного мозга. В настоящей статье исследуется возможность использования метода количественной оценки рекуррентных диаграмм с целью анализа влияния геомагнитного поля на электроэнцефалограмму человека. Свойство рекуррентности присуще сложным динамическим системам и, в частности, мозгу. Показано, что рекуррентная ЭЭГ перед эпилептическим приступом значительно меняется, и это может служить надежным ЭЭГ-индикатором приближающегося припадка.

1. Метод рекуррентных диаграмм

При помощи предложенного в 1987 г. Экманом и др. [1] способа отображения m -мерной фазовой траектории состояний $x(t)$ 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, мы получаем рекуррентную диаграмму (recurrence plot, RP):

$$R_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|x_i - x_j\|), \quad xR^m, \quad i, j = 1 \dots N, \quad (1)$$

где N — количество рассматриваемых состояний x_i ; ε_i — размер окрестности точки x в момент i ; Θ — функция Хэвисайда. Поскольку $N_{i,j} = 1 (i = 1 \dots N)$ 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. Нерационально и, как правило, невозможно обнаружить полную рекуррентность в смысле $x_i = x_j$ (состояние динамической, а особенно хаотической, системы не повторяется полностью эквивалентно начальному состоянию, а подходит

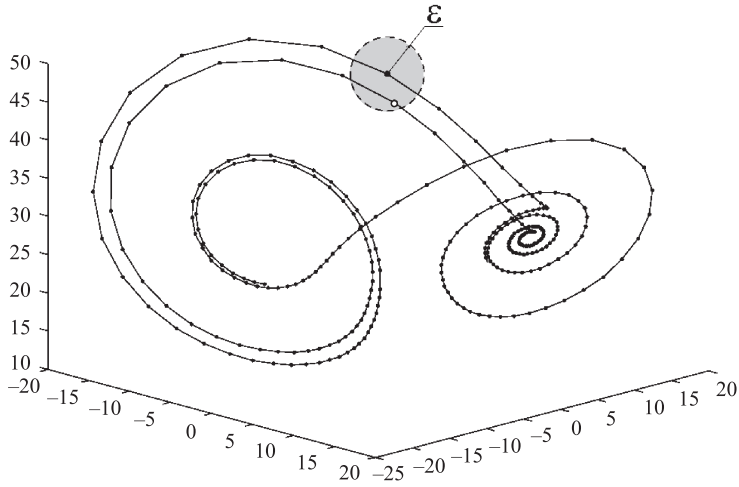


Рис. 1. Получение рекуррентной диаграммы на примере фрагмента траектории системы Лоренца ($r=28$, $\sigma = 10$, $b=3/8$, три компоненты, длина временного ряда 200 отсчетов).

Белая точка рекуррентна точке в центре шара радиусом ϵ

к нему сколь угодно близко). Таким образом, рекуррентность выражается в достаточной близости состояния x_j состоянию x_i . Иными словами, рекуррентными являются состояния x_j , попадающие в m -мерную окрестность с радиусом ϵ_i и центром в x_i . Эти точки называются рекуррентными точками (recurrence points). В выражении (1) это описывается функцией Хэвисайда и ее параметром ϵ_i . Рис. 1 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. 2).

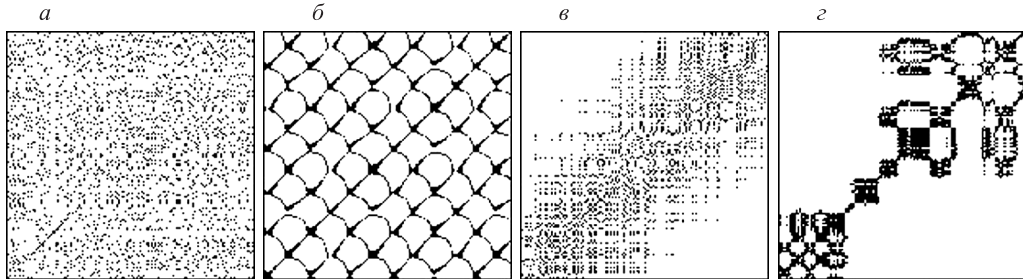


Рис. 2. Характерные топологии рекуррентных диаграмм: *a* — однородная (нормально распределенный шум); *б* — периодическая (генератор Ван дер Поля); *в* — дрейф (отображение Икеды с наложенной линейно-растущей последовательностью); *г* — контрастные области или полосы (обобщенное броуновское движение)

2. Количественный анализ

Очевидно, что образуемые структуры рекуррентных диаграмм можно некоторым образом анализировать численно. Збилут (Zbilut) и Вебер (Webber) разработали количественный анализ рекуррентных диаграмм (recurrence quantification analysis, RQA) [2, 4] для определения численных показателей рекуррентной диаграммы. Они предложили меры, использующие плотность рекуррентных точек и диагональные структуры диаграммы: показатель подобия (RR), детерминизм (DET), максимальная длина диагональных линий (L), энтропия (ENTR), тренд (TREND). Несколько позже Марван (Marwan) предложил [3] меры, основанные на горизонтальных (вертикальных) структурах рекуррентных диаграмм: замирание (LAM) и показатель задержки (TT). В работе [5] предложена мера (CLEAN) оценки баланса между стохастической и детерминистской составляющей. Как правило, для вычисления мер используются рекуррентные диаграммы с постоянным значением порога $varepsilon$.

Мера рекуррентности (recurrence rate, RR)

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

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

$$DET = \frac{\sum l P_\varepsilon(l)}{\sum R_{i,j}^{m,\varepsilon}} \quad (3)$$

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 $l_{\min} = 1$ и $DET = 1$. 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

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

— 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 [1]. 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:

$$\text{ENTR} = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l), \quad (6)$$

где

$$p(l) = \frac{P^\varepsilon(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^\varepsilon(l)}, \quad (7)$$

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:

$$\text{RATIO} = N_2 \frac{\sum l P_\varepsilon(l)}{(\sum l P_\varepsilon(l))^2}. \quad (8)$$

Эвристическое изучение физиологических систем показало [6], что эта мера может быть использована для распознавания фазовых переходов в случаях, когда RR уменьшается, а DET остается постоянной.

Мера замирания (laminarity, LAM)

$$\text{LAM} = \frac{\sum \nu P^\varepsilon(\nu)}{\sum R^m, \varepsilon_{i,j}} \quad (9)$$

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

Средняя длина горизонтальных структур (trapping time, TT)

$$\text{TT} = \frac{\sum_{\nu=\nu_{\min}}^N \nu P^\varepsilon(i)}{\sum_{\nu=\nu_{\min}}^N P_\varepsilon \nu} \quad (10)$$

называется показателем задержки 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.

Мера отношения количества точек, формирующих диагональные линии длиной $l < l_{\min}$, к количеству точек, формирующих диагональные линии $l > l_{\min}$,

$$\text{CLEAN} = \frac{\sum_{l=1}^{l_{\min}-1} l P^\varepsilon(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^{N_l} l P^\varepsilon(l)} \quad (11)$$

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

3. База ЭЭГ-данных

Обрабатывалась база ЭЭГ-данных 10 испытуемых (4 женщины и 6 мужчин) в возрасте от 20 до 65 лет. База данных включала записи электроэнцефалограммы, осуществленной с 16 отведениями при трех фоновых условиях: два с открытыми глазами

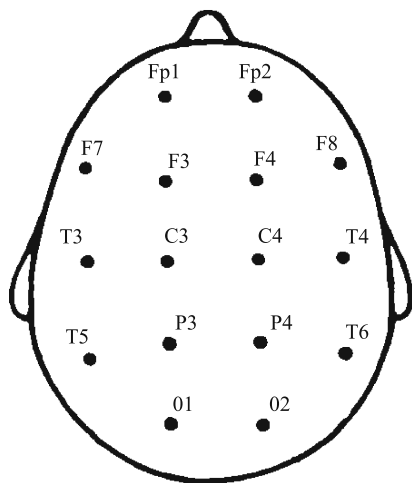


Рис. 3. Международная система отведений 10-20, в соответствии с которой регистрировалась ЭЭГ

и одно с закрытыми глазами. Каждый испытуемый принял участие в 15–50 лонгитюдных экспериментах, проводимых в период от полугода до года. Регистрация ЭЭГ осуществлялась по международной системе отведений 10/20 во фронтальных, височных, центральных, теменных и затылочных отведениях левого и правого полушарий (рис. 3). Длина записи ЭЭГ составляла около 1 мин для каждого из трех фонов, ЭЭГ квантовалась с частотой 200 раз в секунду. Постоянная времени составляла 0.3 с, а верхняя частота 30 Гц. Для каждого испытуемого для всех 16 отведений и трех фоновых состояний вычислялись девять рекуррентных мер ЭЭГ (RR, DET, L, DIV, ENTR, RATIO, LAM, TT, CLEAN), после чего рассчитывался коэффициент корреляции с индексом геомагнитной активности A_p в день проведения опыта. При этом использовалось два индекса: планетарный A_p и локальный суточный К-индекс, последний

брался с сайта финской обсерватории (Sodankylä). При анализе данных рассматривались только значимые коэффициенты корреляции рекуррентных показателей с планетарным A_p - и локальным К-индексом.

4. Результаты исследования

В табл. 1 и 2 представлены данные о количестве значимых взаимосвязей с планетарным и локальным К-индексом, усредненные по всем 16 отведениям ЭЭГ и трем фоновым состояниям. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что количество значимых взаимосвязей с рекуррентными показателями в целом больше с локальным К-индексом. Следует подчеркнуть также, что данные характеризовались индивидуальными отличиями. Так, у некоторых испытуемых было обнаружено достаточно большое число достоверных коэффициентов корреляции с глобальным A_p -индексом (больше 70), в то время как у других количество значимых корреляций было небольшим (около 20). Соответствующие данные по локальному индексу равны 94 и 45. Анализ таблиц показывает, что результаты по различным рекуррентным показателям заметно не отличаются друг от друга. Исходя из этого, данные по девяти рекуррентным показателям

Таблица 1. Количество значимых корреляций девяти рекуррентных показателей ЭЭГ, вычисленных с помощью формул (2)–(10), с планетарным индексом геомагнитной активности (Ap)

| № п/п | <i>RR</i> | <i>DET</i> | <i>L</i> | <i>DIV</i> | <i>ENTR</i> | <i>RATIO</i> | <i>LAM</i> | <i>TT</i> | <i>CLEAN</i> | Сумма |
|-------|-----------|------------|----------|------------|-------------|--------------|------------|-----------|--------------|-------|
| 1 | 1 | 2 | 0 | 1 | 5 | 4 | 1 | 1 | 4 | 19 |
| 2 | 5 | 0 | 4 | 2 | 2 | 4 | 0 | 3 | 0 | 20 |
| 3 | 5 | 6 | 6 | 8 | 6 | 3 | 9 | 7 | 5 | 55 |
| 4 | 8 | 5 | 4 | 5 | 0 | 7 | 5 | 4 | 7 | 51 |
| 5 | 3 | 0 | 0 | 9 | 0 | 7 | 8 | 0 | 8 | 35 |
| 6 | 7 | 16 | 3 | 6 | 3 | 4 | 17 | 3 | 14 | 73 |
| 7 | 7 | 5 | 8 | 10 | 8 | 12 | 5 | 9 | 5 | 69 |
| 8 | 8 | 3 | 6 | 5 | 4 | 12 | 4 | 5 | 4 | 51 |
| 9 | 10 | 7 | 8 | 12 | 8 | 10 | 7 | 9 | 8 | 79 |
| 10 | 7 | 9 | 5 | 9 | 8 | 5 | 7 | 6 | 11 | 67 |
| ИТОГО | 61 | 53 | 44 | 67 | 48 | 70 | 63 | 47 | 66 | 519 |

Таблица 2. Количество значимых корреляций девяти рекуррентных показателей ЭЭГ, вычисленных с помощью формул (2)–(10), с локальным индексом геомагнитной активности (K)

| № п/п | <i>RR</i> | <i>DET</i> | <i>L</i> | <i>DIV</i> | <i>ENTR</i> | <i>RATIO</i> | <i>LAM</i> | <i>TT</i> | <i>CLEAN</i> | Сумма |
|-------|-----------|------------|----------|------------|-------------|--------------|------------|-----------|--------------|-------|
| 1 | 7 | 9 | 9 | 5 | 8 | 8 | 10 | 9 | 9 | 74 |
| 2 | 6 | 3 | 6 | 8 | 5 | 4 | 4 | 6 | 3 | 45 |
| 3 | 7 | 10 | 8 | 7 | 10 | 8 | 9 | 9 | 9 | 77 |
| 4 | 4 | 7 | 6 | 6 | 7 | 9 | 13 | 6 | 11 | 69 |
| 5 | 11 | 4 | 2 | 8 | 7 | 7 | 9 | 1 | 8 | 57 |
| 6 | 6 | 9 | 2 | 4 | 2 | 7 | 12 | 2 | 8 | 52 |
| 7 | 8 | 7 | 14 | 11 | 14 | 13 | 8 | 12 | 7 | 94 |
| 8 | 5 | 5 | 4 | 7 | 5 | 12 | 5 | 4 | 5 | 52 |
| 9 | 12 | 5 | 9 | 11 | 7 | 9 | 8 | 9 | 6 | 76 |
| 10 | 10 | 9 | 8 | 5 | 8 | 4 | 8 | 7 | 9 | 68 |
| ИТОГО | 76 | 68 | 68 | 72 | 73 | 81 | 86 | 65 | 75 | 664 |

телям были усреднены отдельно для левых и правых отведений ЭЭГ. Как оказалось, и планетарный, и локальный индексы имели значимо большее количество корреляций в левом полушарии (уровень значимости 5 и 1% соответственно) по сравнению с правым.

5. Обсуждение полученных результатов

Как же можно проинтерпретировать полученные выше результаты? Во-первых, большее число достоверных взаимосвязей параметров геомагнитной активности с рекуррентными показателями ЭЭГ свидетельствует о влиянии геомагнитного поля на состояние мозга человека. Вполне понятен также тот факт, что локальный индекс более тесно связан с рекуррентными показателями по сравнению с планетарным Ар-индексом. Это объясняется тем, что локальный индекс более точно отражает состояние геомагнитного поля в Санкт-Петербурге, находящемся на близкой долготе. Факт существенного различия числа достоверных связей у разных испытуемых говорит об индивидуальных особенностях их реагирования, в частности чувствительности к изменениям интенсивности геомагнитного поля. Наличие значимо большего числа

достоверных связей геомагнитной активности с рекуррентными показателями в левом полушарии по сравнению с правым можно объяснить следующим образом. В предыдущей работе [6] нами было показано, что Ар-индекс положительно связан с уровнем пространственной синхронизации ЭЭГ височных областей правого полушария с другими его отведениями. Подчеркнем, что пространственная синхронизация ЭЭГ представляет собой коэффициент взаимной корреляции ЭЭГ определенных двух отведений при нулевой задержке. Таким образом, получается, что чем выше значение геомагнитной активности, тем более регулярной (синхронизированной) становится ЭЭГ в правом полушарии и соответственно тем менее дифференцированной (отличимой) и более похожей ЭЭГ оказывается в разных отведениях. Как следствие, это приводит к уменьшению числа значимых корреляций в правом полушарии. В левом полушарии отсутствие достоверных взаимосвязей между пространственной синхронизацией ЭЭГ и Ар-индексом проявляется в том, что отведения оказываются относительно независимыми, что и отражается в относительно большем числе значимых корреляций с рекуррентными показателями.

Выводы

1. Полученные данные свидетельствуют о значимом влиянии напряженности геомагнитного поля на рекуррентную динамику ЭЭГ. При этом взаимосвязь с показателями локальной напряженности геомагнитного поля выше, чем с планетарным показателем.
2. Показано наличие существенно большего числа достоверных связей геомагнитной активности с рекуррентностью ЭЭГ левого полушария.

Указатель литературы

1. *Eckmann J.P., Kamphorst S. O., Ruelle D.* Recurrence plots of dynamical systems // *Europhysics Letters*. 1987. Vol. 5. P. 973–977.
2. *Zbilut J. P., Webber Jr. C. L.* Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots // *Physics Letters A* 171 (3–4). 1992. P. 199–203.
3. *Marwan N., Meinke A.* Extended Recurrence Plot Analysis and its Application to ERP Data // *International Journal of Bifurcation and Chaos «Cognition and Complex Brain Dynamics»*. 2004. Vol. 14 (2).
4. *Webber Jr. C. L., Zbilut J. P.* Dynamical assessment of physiological systems and states using recurrence plot strategies // *Journal of Applied Physiology*. 1994. Vol. 76 (2). P. 965–973.
5. *Киселев В. Б.* Определение стабильности траектории процесса в фазовом пространстве при помощи рекуррентного анализа // *Научно-технический вестник ГУИТМО*. СПб., 2007. Вып. 20. С. 121–130.
6. *Кануников И. Е., Белов Д. Р., Гетманенко О. В.* Влияние геомагнитной активности на электроэнцефалограмму человека // *Экология человека*. 2010. № 6. С. 6–11.