

Оригинальное исследование

DOI: 10.31862/2500-2961-2025-15-4-ma-dv-set

УДК 159.963.2

А.Е. Манаенков, В.Б. Дорохов

Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН,
117485 г. Москва, Российская Федерация

Динамика альфа- и аperiodической активности МЭГ при множественных засыпаниях во время выполнения монотонного психомоторного теста

В современной литературе все чаще подчеркивается необходимость учитывать аperiodическую активность при анализе электроэнцефалограммы и магнитоэнцефалограммы (МЭГ). Существует ряд исследований, иллюстрирующих пользу этого показателя при стадировании ночного сна, однако на материале кратковременных засыпаний и пробуждений аperiodическая активность не изучалась. Цель данного исследования – качественно и количественно описать динамику аperiodической активности при выполнении монотонной поведенческой деятельности с множественными эпизодами засыпаний и пробуждений. 25 испытуемых проходили монотонный психомоторный тест в течение 1 часа с одновременной регистрацией МЭГ. Динамика его выполнения (с множественными засыпаниями и пробуждениями) соотносилась с динамикой мощности альфа-активности и значения аperiodической экспоненты – визуально и с расчетом коэффициента корреляции Спирмена. У 23 испытуемых динамика аperiodической

© Манаенков А.Е., Дорохов В.Б., 2025

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



экспоненты отражала изменения в качестве выполнения психомоторного теста. В случае 11 испытуемых связь альфа-активности и аperiodической активности с качеством выполнения теста была сопоставима. Для 5 испытуемых более информативной была аperiodическая активность, для 9 более информативной была альфа-активность. Выводы: аperiodическая активность является информативным показателем уровня бодрствования и должна рассматриваться вместе со стандартными критериями, основанными на периодической составляющей электрической активности мозга.

Ключевые слова: кратковременные засыпания, аperiodическая активность, альфа-активность, магнитоэнцефалография, психомоторный тест

ССЫЛКА НА СТАТЬЮ: Манаенков А.Е., Дорохов В.Б. Динамика альфа- и аperiodической активности МЭГ при множественных засыпаниях во время выполнения монотонного психомоторного теста // Социально-экологические технологии. 2025. Т. 15. № 4. С. 466–480. DOI: 10.31862/2500-2961-2025-15-4-ma-dv-set

Original research

DOI: 10.31862/2500-2961-2025-15-4-ma-dv-set

A.E. Manaenkov, V.B. Dorokhov

Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology,
Russian Academy of Science,
Moscow, 117485, Russian Federation

Dynamics of alpha and aperiodic activity of MEG in multiple episodes of falling asleep during a monotonous psychomotor test

Modern literature increasingly emphasizes the need to take aperiodic activity into account when analyzing electroencephalogram and magnetoencephalogram (MEG) signals. There are a number of studies illustrating the benefits of this indicator in nocturnal sleep staging, however, aperiodic activity has not been studied in short-term wake-sleep and sleep-wake transitions. Objective: to describe qualitatively and quantitatively

the dynamics of aperiodic activity during monotonous behavioral activity with multiple episodes of falling asleep and waking up. 25 subjects underwent a monotonous psychomotor test for 1 hour with simultaneous registration of a magnetoencephalogram. The dynamics of its execution (with multiple episodes of falling asleep and waking up) were compared with the dynamics of the power of alpha activity and the value of the aperiodic exponent – both visually and with the calculation of the Spearman correlation coefficient. In 23 subjects, the dynamics of the aperiodic exponent reflected changes in the quality of the psychomotor test execution. For 11 subjects, alpha activity and aperiodic activity had similar correlations with behavioral dynamics. Aperiodic activity was more informative for 5 subjects, and alpha activity was more informative for 9. Conclusions: aperiodic activity is an informative indicator of the level of vigilance and should be considered together with standard criteria based on the periodic component of brain electrical activity. **Key words:** short-term falling asleep, aperiodic activity, alpha activity, magnetoencephalography, psychomotor test

CITATION: Manaenkov A.E., Dorokhov V.B. Dynamics of alpha and aperiodic activity of MEG in multiple episodes of falling asleep during a monotonous psychomotor test. *Environment and Human: Ecological Studies*. 2025. Vol. 15. No. 4. Pp. 466–480. DOI: 10.31862/2500-2961-2025-15-4-ma-dv-set

Введение

В нейронауках периодическую активность (осцилляции электроэнцефалограммы и магнитоэнцефалограммы, ЭЭГ/МЭГ) связывают с широким количеством когнитивных функций и даже воспринимают как фундаментальный процесс, через который различные нейронные популяции координируются в функциональных сетях головного мозга. Особую роль периодическая ЭЭГ-активность играет в стадировании сна: внушительная часть критериев, по которым определяется текущее функциональное состояние человека, основана на возникновении, исчезновении и смене пространственных характеристик периодической ЭЭГ-активности разной частоты [Berry et al., 2017]. Ввиду этого среди исследователей сна популярны методы спектрального анализа, основанные на анализе Фурье – математической процедуре, представляющей сигнал в виде суммы синусоид и чувствительной к его ритмическим характеристикам.

Однако результаты спектрального анализа ЭЭГ/МЭГ требуют осторожности в интерпретации, т.к. спектральными характеристиками

обладают и сигналы без ритмической составляющей [Donoghue, Schaworonkow, Voytek, 2021]. В случае ЭЭГ/МЭГ спектр сигнала часто имеет характерную форму обратной пропорциональности между частотой и ее мощностью: низкие частоты имеют более высокую мощность, а высокие – более низкую. Подобная форма спектра может возникнуть без существования нейронных осцилляций, а сами осцилляции обычно отображаются как пики активности, «наложенные» на спектр аperiodического сигнала (т.е. сигнала без ритмической активности) [Donoghue et al., 2020]. При этом аperiodическая компонента не является статической и варьируется с течением времени, что является серьезной проблемой при интерпретации результатов спектрального анализа.

Эта методологическая проблема означает необходимость эксплицитного разделения периодической и аperiodической составляющих спектра в любой научной области, использующей спектральный анализ как инструмент изучения физиологических механизмов когнитивных процессов – и исследования сна могут выиграть от этого больше всего. При этом важно понимать, что аperiodическая активность сама по себе не является лишенным физиологического смысла процессом: наиболее популярная модель связывает ее характеристики с балансом возбуждения и торможения в структурах головного мозга, а также в целом со скоростью затухания синаптических токов [Gao, Peterson, Voytek, 2017; Gao et al., 2020]. На данный момент уже существует ряд исследований, оценивающих динамику аperiodической компоненты ЭЭГ при смене стадий сна [Horváth et al., 2022; Kozhemiako et al., 2022; Ameen et al., 2024].

Однако в контексте более кратковременных, локальных эпизодов засыпания (например, на фоне длительной монотонной деятельности) аperiodическая активность не исследовалась. Состояния, находящиеся на границе между сном и бодрствованием, на данный момент являются наименее изученными и наиболее спорными [Lasaux et al., 2024]; не существует единого временного интервала, в котором заканчивается бодрствование и начинается сон [Ogilvie, 2001]. По сравнению с другими стадиями сна, выделение стадии сна N1 («дремотное состояние») вызывает наибольшие разногласия среди экспертов [Vallat, Walker, 2021].

Мы предполагаем, что явный учет аperiodической активности при анализе кратковременных засыпаний даст более точное описание динамики физиологических процессов, протекающих при переходе от бодрствования ко сну (а также при переходе от сна к бодрствованию). Целью текущего исследования является качественное и количественное описание динамики периодической и аperiodической активности МЭГ

во время выполнения монотонной поведенческой деятельности с множественными эпизодами засыпаний и пробуждений.

Задачи исследования:

- 1) реализовать экспериментальную процедуру с выполнением монотонного психомоторного теста с одновременной регистрацией магнитоэнцефалограммы (МЭГ);
- 2) выделить аperiodические характеристики МЭГ, а также выделить активность альфа-диапазона (8–11 Гц) и ее амплитуду/мощность;
- 3) визуально и количественно сопоставить динамику двух видов активности (аperiodическая активность и альфа-активность МЭГ) с качеством выполнения поведенческой задачи, а также между собой.

Материалы и методы

Выборку составили 25 добровольцев (18 девушек и 7 юношей, средний возраст – $22,6 \pm 2,1$ года). Данные были записаны в сотрудничестве с Центром нейрокогнитивных исследований (МЭГ-центром) при Московском городском психолого-педагогическом университете на установке Elekta Vector View Neuromag (Хельсинки, Финляндия). Установка содержит 306 сенсоров, из которых 102 являются магнетометрами, а 204 – планарными градиометрами. Сигнал регистрировался с частотой дискретизации 1000 Гц. Также регистрировались 5-минутные записи пустой комнаты для оценки нефизиологического шума.

Исследование продолжалось 60 мин, во время которых испытуемый должен был с закрытыми глазами считать «про себя» от 1 до 10 с частотой приблизительно 1 раз/с, одновременно с каждым счетом нажимая на кнопку, сначала 10 раз правой, а потом левой рукой поочередно. Нажатия на кнопки регистрировались в виде механограммы: к каждой руке испытуемого прикреплялась кнопка, чувствительная к нажатиям [Дорохов, 2003].

Обработка данных производилась с помощью MNE-Python [Gramfort et al., 2014]. Все данные МЭГ были очищены от нефизиологического шума методом фильтра Максвелла. Чтобы сократить количество анализируемых сенсоров, данные также были реконструированы в пространстве источников методом sLORETA и парцеллированы на 68 зон согласно атласу Desikan – Killiany [Desikan et al., 2006].

Полученные источники были разделены на 10-секундные эпохи с 50-процентным перекрытием. В каждой из эпох по каждой зоне рассчитывался спектр сигнала, который затем разделялся на периодическую и аperiodическую составляющую с помощью инструмента foof0.

В нем аperiodическая составляющая моделируется следующим уравнением:

$$\log(L) = \beta_0 - \log(k + F^{\beta_1}), \quad (1)$$

где F – частота, Гц; L – мощность частоты, Вт/Гц; β_0 – константа; β_1 – коэффициент связи между частотой и ее мощностью (экспонента); k – «точка перегиба» спектра, Гц.

В свою очередь, периодическая составляющая представлена набором пиков, моделируемых с помощью гауссовских функций:

$$G_n = a \exp\left(\frac{-(F-c)^2}{2w^2}\right), \quad (2)$$

где G_n – конкретный пик; a – высота пика (= мощность осцилляции); c – центральная частота пика (= частота осцилляции); w – ширина пика.

Алгоритм foof работает следующим образом.

1. На основе спектра в лог-лог шкале оцениваются параметры аperiodической активности.
2. Оцененная аperiodическая активность вычитается из спектра.
3. На оставшемся спектре моделируется самый высокий осцилляторный пик.
4. Смоделированный пик вычитается из оставшегося спектра, после чего моделируется следующий пик.
5. Пункты 3–4 повторяются до тех пор, пока не достигается минимальная допустимая высота пика.
6. Смоделированная таким образом периодическая активность вычитается из оригинального спектра.
7. На оставшемся спектре снова оцениваются параметры аperiodической активности.

Более подробное описание вышеприведенных формул и принципа работы алгоритма foof приведено в статье [Donoghue et al., 2020].

Для каждого источника в момент времени рассчитывались:

- 1) амплитуда мощности пиков активности в частотном диапазоне 8–11 Гц (альфа-активность);
- 2) значение аperiodической экспоненты (более высокие значения означают более высокую мощность низких частот относительно высоких частот).

Дальнейшая подготовка данных и визуализация проводились с помощью языка программирования R, в частности, с использованием tidyverse. Для обоих показателей считалось среднее по источникам

в момент времени, после чего их динамика визуально сопоставлялась с динамикой выполнения поведенческой задачи.

В выполнении поведенческой задачи выделялось три основных состояния:

- 1) корректное выполнение задачи («Верно»);
- 2) выполнение с ошибками (избыточные нажатия либо неполные нажатия, «Ошибка»);
- 3) «Сон» (отсутствие активности 10 секунд и более).

Все три показателя (поведение, альфа-активность и экспонента) были интерполированы до временного разрешения в 1 с – для альфа-и аperiodической экспоненты использовалась линейная интерполяция, для поведения использовалась последняя категория (например, если на 10-й секунде выполнение теста было корректным («Верно»), на 11-й секунде нажатий не было, а на 12-й секунде начались нажатия с ошибками («Ошибка»), то на 11-й секунде подставляется значение «Верно»).

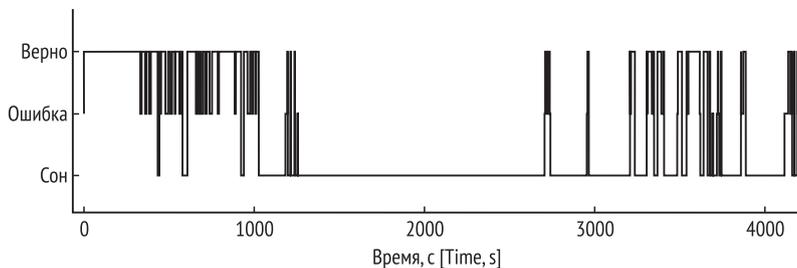
Наконец, для количественной оценки связи между всеми парами показателей во времени (поведение, мощность альфа-активности, аperiodическая экспонента) считался ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Поведенческие категории для этого были перекодированы целыми числами от 1 («Верно») до 3 («Сон»).

Рис. 1. Динамика выполнения психомоторного теста и показателей МЭГ у одного из испытуемых:

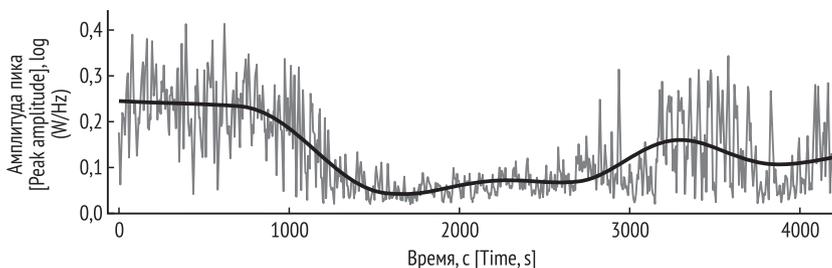
a – поведенческие данные, представленные в виде псевдогипнограммы; сверху вниз представлены три состояния выполнения задачи: выполнение без ошибок, выполнение с ошибками, отсутствие активности («сон»); *b* – динамика мощности альфа-активности (8–11 Гц), усредненной по всем источникам; серая линия обозначает «сырые» значения мощности, черная – их сглаженные значения, построенные по алгоритму GAM (обобщенная аддитивная модель); *c* – динамика аperiodической экспоненты; серая линия обозначает «сырые» значения мощности, черная – их сглаженные значения

Fig. 1. Dynamics of psychomotor test performance and MEG indicators in one subject:

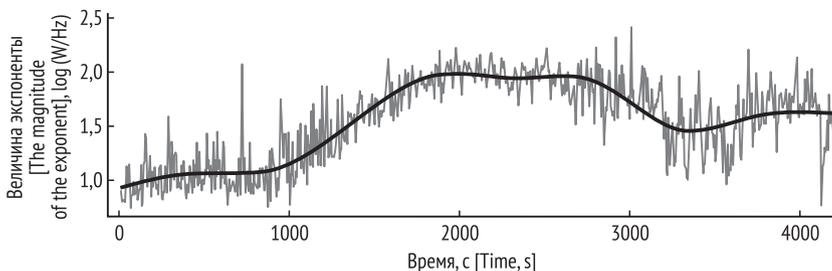
a – behavioral data presented in the form of a pseudohypnogram; from top to bottom, three states of task performance are presented: performance without errors, performance with errors, no activity (“sleep”); *b* – dynamics of alpha activity power (8–11 Hz), averaged over all sources; the gray line denotes the “raw” power values, the black line denotes their smoothed values constructed using the GAM (generalized additive model) algorithm; *c* – dynamics of the aperiodic exponential; the gray line denotes the raw power values, the black line – their smoothed values



a



b



c

Результаты

У 23 испытуемых из 25 динамика аперриодической экспоненты положительно и нетривиально ($r > 0,1$) коррелировала с динамикой выполнения психомоторного теста (средняя корреляция 0,42, стандартное отклонение 0,25): экспонента росла при появлении ошибок и особенно при переходе ко сну. При этом у 22 испытуемых ее динамика имела нетривиальные отрицательные корреляции с динамикой альфа-активности (средняя корреляция минус 0,49, стандартное отклонение 0,22). Пример такой динамики с результатами одного из испытуемых приведен на рис. 1.

Рис. 2. Динамика выполнения психомоторного теста и показателей МЭГ у испытуемой со стабильно высоким уровнем выполнения задачи:

a – поведенческие данные, представленные в виде псевдогипнограммы; сверху вниз представлены три состояния выполнения задачи: выполнение без ошибок, выполнение с ошибками, отсутствие активности («сон»); *b* – динамика мощности альфа-активности (8–11 Гц), усредненной по всем источникам; серая линия обозначает «сырые» значения мощности, черная – их сглаженные значения, построенные по алгоритму GAM (обобщенная аддитивная модель); *c* – динамика аperiodической экспоненты; серая линия обозначает «сырые» значения мощности, черная – их сглаженные значения

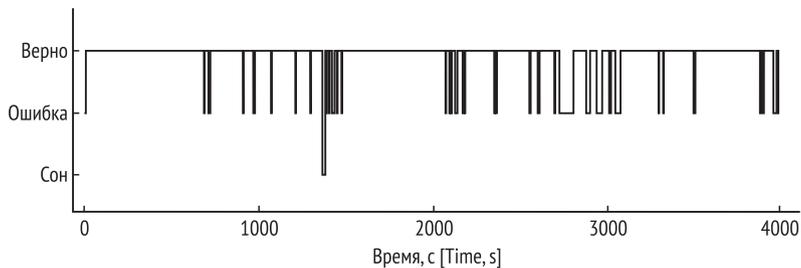
Fig. 2. Dynamics of psychomotor test performance and MEG indicators in a subject with a consistently high level of task performance:

a – behavioral data presented in the form of a pseudohypnogram; from top to bottom, three states of task performance are presented: performance without errors, performance with errors, no activity (“sleep”); *b* – dynamics of alpha activity power (8–11 Hz), averaged over all sources; the gray line denotes the “raw” power values, the black line denotes their smoothed values constructed using the GAM (generalized additive model) algorithm; *c* – dynamics of the aperiodic exponential; the gray line denotes the raw power values, the black line – their smoothed values

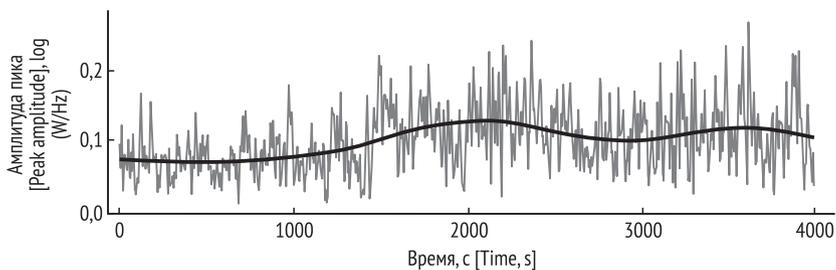
Для 11 испытуемых информативность как альфа-, так и аperiodической активности относительно динамики поведения испытуемых была сопоставимой (различия между корреляциями по модулю не превышали 0,1).

Для 5 испытуемых аperiodическая экспонента оказалась более информативным показателем (среднее различие 0,29, стандартное отклонение 0,16), а для 9 более информативной оказалась альфа-активность (среднее различие 0,24, стандартное отклонение 0,15). При этом важно отметить то, что у одной испытуемой с «более информативной» альфа-активностью было очень мало ошибок и пониженные значения экспоненты на протяжении всего эксперимента (рис. 2) по сравнению с остальными испытуемыми с похожим паттерном (рис. 3). Видно, что значения экспоненты у испытуемой со стабильно высоким уровнем выполнения задачи держатся в районе 1,0; для сравнения: при переходе ко сну экспонента стремительно доходит до значения 2,0, а затем опускается до 1,5 при учащении пробуждений (см. рис. 1).

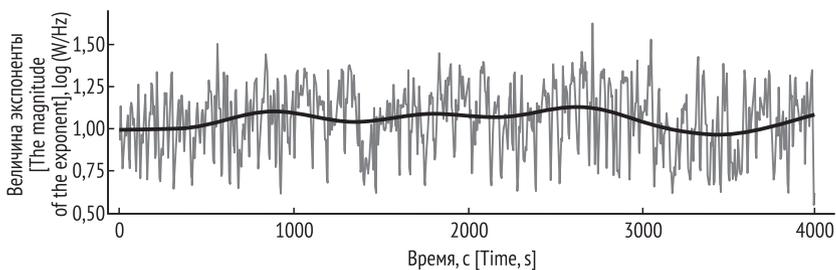
У испытуемого с двумя выраженными эпизодами множественных засыпаний видно, что альфа-активность отчетливо меняется во время этих эпизодов, в отличие от экспоненты; но также видно, что экспонента стабильно держится на высоком уровне 1,5 (см. рис. 3).



a



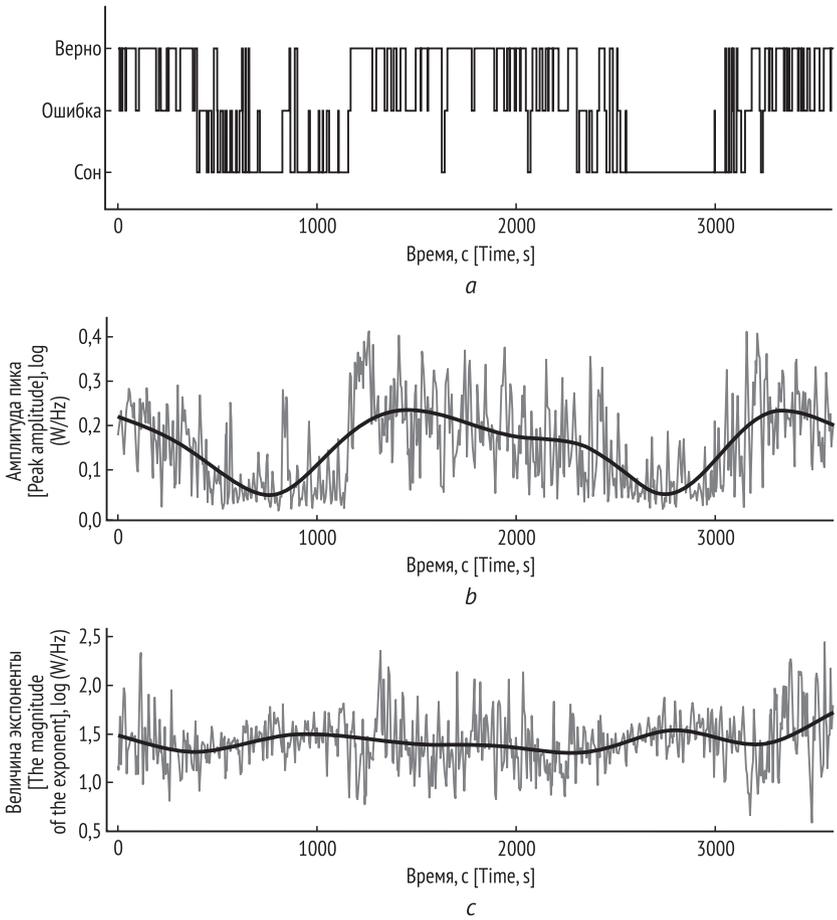
b



c

Обсуждение

Полученные нами результаты согласуются с результатами работ, проведенных на материале полноценного ночного сна [Horváth et al., 2022; Kozhemiako et al., 2022; Ameen et al., 2024]; при засыпаниях (как длительных, так и кратковременных) значения аperiodической экспоненты растут у большинства испытуемых. Этот рост также согласуется с интерпретацией этого показателя как индекса отношения возбуждения/торможения; высокие значения экспоненты отражают более выраженную широкополосную низкочастотную динамику, характерную для ГАМК_a-рецепторов [Gao, Peterson, Voytek, 2017].



Не является неожиданной и динамика альфа-подобной активности – известно, что альфа-ритм ослабевает при переходе от бодрствования к первой стадии сна (N1) [Ogilvie, 2001]. Важно отметить наличие свидетельств в пользу взаимодействия альфа- и аperiodической активности: в одной работе предлагается модель альфа-ритма как модулятора активности возбуждающих и тормозящих нейронов коры [Peterson, Voytek, 2017], а в другой описывается роль альфа-ритма в регулировании глобальной разномасштабной активности нейронных сетей головного мозга, к которой относится и аperiodическая [Lombardi et al., 2022]. Это вполне может объяснить паттерн антикорреляции, наблюдаемый у большинства испытуемых в нашем исследовании.

Рис. 3. Динамика выполнения психомоторного теста и показателей МЭГ у испытуемого с двумя выраженными эпизодами множественных засыпаний:

a – поведенческие данные, представленные в виде псевдогипнограммы; сверху вниз представлены три состояния выполнения задачи: выполнение без ошибок, выполнение с ошибками, отсутствие активности («сон»); *b* – динамика мощности альфа-активности (8–11 Гц), усредненной по всем источникам; серая линия обозначает «сырые» значения мощности, черная – их сглаженные значения, построенные по алгоритму GAM (обобщенная аддитивная модель); *c* – динамика аperiodической экспоненты; серая линия обозначает «сырые» значения мощности, черная – их сглаженные значения

Fig. 3. Dynamics of psychomotor test performance and MEG indices in a subject with two pronounced episodes of multiple falling asleep:

a – behavioral data presented in the form of a pseudohypnogram; from top to bottom, three states of task performance are presented: performance without errors, performance with errors, no activity (“sleep”); *b* – dynamics of alpha activity power (8–11 Hz), averaged over all sources; the gray line denotes the “raw” power values, the black line denotes their smoothed values constructed using the GAM (generalized additive model) algorithm; *c* – dynamics of the aperiodic exponential; the gray line denotes the raw power values, the black line – their smoothed values

В то же время хорошо видно, что эти два показателя не являются полными дублями друг друга во всех ситуациях: лучше всего это заметно в тех случаях, когда средняя мощность альфа-активности варьируется при изменениях качества выполнения задачи, а аperiodическая – нет (см. рис. 3). Возможное объяснение этого феномена заключается в уровне «масштаба» показателя: аperiodическая экспонента может отражать более глобальные аспекты уровня бодрствования, в то время как осцилляции (альфа-активность, в частности) отвечают за более локальные аспекты. Подобный взгляд согласуется с результатом, показанным в работе, где авторы демонстрируют, что изменения в аperiodической активности стабильно детектируют смену стадий сна по всем сенсорам ЭЭГ, в отличие от более локальных осцилляторных изменений [Hebron et al., 2025]. Это же объясняет наблюдение, продемонстрированное на рис. 2, 3: по всей видимости, экспонента может индексировать глобальные характеристики уровня бодрствования испытуемого, влияющие на общее качество выполнения задачи на протяжении всего эксперимента.

Здесь стоит отметить два важных ограничения исследования.

Во-первых, широкое разнообразие паттернов динамики как поведенческой, так и физиологической активности затрудняет использование

статистических методов для количественной оценки связи между ними. Ряд наблюдений, описанных выше, имеет скорее качественный характер и полагается на визуальную интерпретацию наблюдений. Хотя мы считаем, что подобный подход снимает ряд ограничений количественного анализа, в будущем будут необходимы исследования, основанные на более строгих формальных критериях.

Во-вторых, исследовалась только усредненная динамика показателей без анализа каждого пространственного источника в отдельности. Это обусловлено как сложностью визуальной интерпретации подобных данных, так и высокими вычислительными затратами для адекватной количественной оценки связей между источниками во времени. Более подробный анализ этого аспекта также должен быть целью дальнейших исследований.

Выводы

1. Аперiodическая экспонента является информативным показателем для анализа динамики уровня бодрствования
2. Ее динамика противоположна динамике альфа-активности
3. При анализе засыпаний важно рассматривать динамику и альфа-, и аперiodической активности, т.к. на индивидуальном уровне один показатель может быть информативнее другого.

Заключение

Полученный результат говорит о том, что при исследовании кратковременных засыпаний важно учитывать и осцилляторную, и аперiodическую активность – как отражающие разные аспекты состояния испытуемого на протяжении времени. Аперiodическая активность может быть нечувствительной к более тонким, локальным изменениям мозговой активности (которые при этом могут проявляться в выраженных изменениях в поведении), в то время как во многом фазический характер осцилляций может быть проблемой при объективной оценке уровня сонливости.

В будущем важно будет проанализировать степень выраженности индивидуальных различий в аперiodической активности, а также ее зависимость от анализируемой полосы частот, метода извлечения и временного промежутка. Возможно, это позволит нам выделить надежный и объективный критерий уровня сонливости, который будет применим в исследовательской и клинической практике.

Библиографический список / References

Дорохов В.Б. Альфа-веретена и К-комплекс – фазические активационные паттерны при спонтанном восстановлении нарушений психомоторной деятельности на разных стадиях дремоты // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 2003. Т. 53. № 4. С. 503–512. [Dorokhov V.B. Alpha-bursts and K-complex: Phasic activation pattern during spontaneous recovery of correct psychomotor performance at difference stages of drowsiness. *Zhurnal vysshei nervnoi deiatelnosti imeni I.P. Pavlova*. 2003. Vol. 53. No. 4. Pp. 503–512. (In Rus.)]

Ameen M.S. et al. The temporal dynamics of aperiodic neural activity track changes in sleep architecture. 2024. DOI: 10.1101/2024.01.25.577204.

Berry R.B. et al. AASM Scoring Manual Updates for 2017 (Version 2.4). *J. Clin. Sleep Med*. 2017. Vol. 13. No. 5. Pp. 665–666.

Desikan R.S. et al. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest. *Neuroimage*. 2006. Vol. 31. Pp. 3. Pp. 968–980.

Donoghue T. et al. Parameterizing neural power spectra into periodic and aperiodic components. *Nat. Neurosci*. 2020. Vol. 23. No. 12. Pp. 1655–1665.

Donoghue T., Schaworonkow N., Voytek B. Methodological considerations for studying neural oscillations. *Eur. J. Neurosci*. 2022. Vol. 55 (11–12). Pp. 3502–3527. DOI: 10.1111/ejn.15361

Gao R. et al. Neuronal timescales are functionally dynamic and shaped by cortical microarchitecture. *eLife*. 2020. Vol. 9. Art. e61277.

Gao R., Peterson E.J., Voytek B. Inferring synaptic excitation/inhibition balance from field potentials. *Neuroimage*. 2017. Vol. 158. Pp. 70–78.

Horváth G.C. et al. Overnight software for processing MEG and EEG data. *Neuroimage*. 2014. Vol. 86. Pp. 446–460.

Horváth G.C. et al. Overnight dynamics in scale-free and oscillatory spectral parameters of NREM sleep EEG. *Sci. Rep*. 2022. Vol. 12. Art. No. 18409.

Hebron H. et al. Aperiodic EEG Activity provides a linear, bidirectional, and spatially uniform marker of subjective and objective vigilance in humans, both within and across states. 2025. DOI: 11.01/2025.08.30.673229.

Kozhemiako N. et al. Sources of variation in the spectral slope of the sleep EEG. *eNeuro*. 2022. Vol. 9. No. 5. DOI: 10.1523/ENEURO.0094-22.2022.

Lacaux C. et al. Embracing sleep-onset complexity. *Trends in Neurosciences*. 2024. Vol. 47. No. 4. Pp. 273–288.

Lombardi F. et al. Alpha rhythm induces attenuation-amplification dynamics in neural activity cascades. 2022. DOI: 10.1101/2022.03.03.482657.

Ogilvie R.D. The process of falling asleep. *Sleep Med. Rev*. 2001. Vol. 5. No. 3. Pp. 247–270.

Peterson E., Voytek B. Alpha oscillations control cortical gain by modulating excitatory-inhibitory background activity. 2017. DOI: 10.1101/185074

Vallat R., Walker M.P. An open-source, high-performance tool for automated sleep staging. *eLife*. 2021. Vol. 10. Art. No. e70092.

Статья поступила в редакцию 19.06.2025, принята к публикации 09.08.2025
The article was received on 19.06.2025, accepted for publication 09.08.2025

Сведения об авторах / About the authors

Манаенков Александр Евгеньевич – младший научный сотрудник лаборатории нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, г. Москва

Alexander E. Manaenkov – junior researcher at the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wake, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1284-8247>

E-mail: allomulder@gmail.com

Дорохов Владимир Борисович – доктор биологических наук; заведующий лабораторией нейробиологии сна и бодрствования, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук, г. Москва

Vladimir B. Dorokhov – Dr. Biol. Hab.; Head of the Laboratory of Neurobiology of Sleep and Wake, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3533-9496>

E-mail: vbdorokhov@mail.ru

Заявленный вклад авторов

А.Е. Манаенков – проведение литературного обзора использования аперiodической активности в исследованиях сна, обработка и анализ данных, визуализация данных

В.Б. Дорохов – руководство исследованием и его организация, организация сбора данных

Contribution of the authors

A.E. Manaenkov – literature review of the use of aperiodic activity in sleep research, data processing and analysis, data visualization

V.B. Dorokhov – study management and organization, data collection

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи
All authors have read and approved the final manuscript