



обзорная статья

<https://elibrary.ru/ddlojo>

## Лонгитюдные исследования нейротипичного развития с использованием ЭЭГ: обзор зарубежных исследований

Павлова Анна Андреевна

НИУ Высшая школа экономики – Москва, Россия, Москва

<https://orcid.org/0000-0003-1566-243X>

annapavlova98hse@gmail.com

**Аннотация:** В статье впервые обобщаются результаты лонгитюдных ЭЭГ-исследований, проведенных на нейротипичных популяциях. Цель – выявить ключевые направления лонгитюдных ЭЭГ-исследований на нейротипичных популяциях, малоисследованные аспекты, а также обобщить основные результаты в рамках каждого из направлений. В результате выявлено 4 основных направления исследования: возрастные изменения ЭЭГ, изменения ЭЭГ после воздействия, ЭЭГ-предикторы социально-эмоциональной сферы, ЭЭГ-предикторы когнитивных навыков. В исследованиях возрастных изменений ЭЭГ описывается снижение апериодической активности мозга в младенческом возрасте, а также снижение активности на низких частотах (дельта- и тета-диапазоны) и повышение активности на высоких частотах (альфа- и бета-диапазоны) как в покое, так и во время сна в детском и подростковом возрасте. В исследованиях изменения ЭЭГ после воздействия подчеркивается влияние медитаций и тренингов осознанности на функционирование мозга (снижение числа и мощности микросостояний) и поведенческие характеристики (повышение стрессоустойчивости и осознанности). В исследованиях социально-эмоциональной сферы раскрывается важность асимметрии активации во фронтальных долях (большая активация в правом полушарии) как предиктора ряда неадаптивных поведенческих черт – общей и социальной тревожности, стеснительности, предпочтения стратегий избегания. Особенно выражена эта связь для лиц, имеющих поведенческие предрасположенности к развитию данных признаков. В исследованиях когнитивных навыков сообщается о большей локализации нейронной активации в ответ на задачу у детей старшего возраста, что связано с улучшением выполнения заданий по мере взросления. Высокая синхронизация различных ритмов также связана с высокими когнитивными способностями у детей и взрослых. Сделан вывод о необходимости проведения лонгитюдных ЭЭГ-исследований, посвященных развитию когнитивных навыков у подростков.

**Ключевые слова:** ЭЭГ, лонгитюдные исследования, возрастные изменения, когнитивные навыки, личностные черты

**Цитирование:** Павлова А. А. Лонгитюдные исследования нейротипичного развития с использованием ЭЭГ: обзор зарубежных исследований. *Вестник Кемеровского государственного университета. Серия: Гуманитарные и общественные науки*. 2025. Т. 9. № 3. С. 337–351. <https://doi.org/10.21603/2542-1840-2025-9-3-337-351>

Поступила в редакцию 08.05.2025. Принята после рецензирования 04.07.2025. Принята в печать 04.07.2025.

review article

## Longitudinal EEG Research on Typically Developed Populations: A Review

Anna A. Pavlova

HSE University – Moscow, Russia, Moscow

<https://orcid.org/0000-0003-1566-243X>

annapavlova98hse@gmail.com

**Abstract:** This review provides the first comprehensive summary of longitudinal electroencephalographic (EEG) studies conducted on neurotypical populations. The objective was to identify the key areas of longitudinal EEG studies in neurotypical populations, define the understudied aspects, and summarize the main results in each area. The review revealed four primary research directions: (1) developmental changes in EEG, (2) EEG changes following interventions, (3) EEG predictors of socio-emotional functioning, (3) EEG predictors of cognitive abilities. The key developmental EEG changes included a decrease in aperiodic brain activity during infancy, as well as a reduction in low-frequency activity (delta and theta bands) and an increase in high-frequency activity (alpha and beta bands)

during rest and sleep in childhood and adolescence. The studies on post-intervention changes highlighted the impact of meditation and mindfulness training on brain functioning (reduced occurrence and power of microstates) and behavioral characteristics (increased stress resilience and mindfulness). The publications on the socio-emotional domain emphasized the importance of frontal asymmetry (greater activation in the right hemisphere) as a predictor of maladaptive behavioral traits, such as general and social anxiety, shyness, and a preference for avoidance strategies. This correlation was reported as typical of individuals with behavioral predispositions to the abovementioned traits. Cognitive studies demonstrated a greater localization of neural activation in response to tasks in older children, which correlated with improved task performance. The high synchronization of various rhythms was also associated with superior cognitive abilities in both children and adults. The review revealed a gap in longitudinal EEG research focused on the development of cognitive skills in teenagers.

**Keywords:** EEG, longitude, developmental changes, cognitive skills, personality traits

**Citation:** Pavlova A. A. Longitudinal EEG Research on Typically Developed Populations: A Review. *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Gumanitarnye i obshchestvennye nauki*, 2025, 9(3): 337–351. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2542-1840-2025-9-3-337-351>

Received 8 May 2025. Accepted after review 4 Jul 2025. Accepted for publication 4 Jul 2025.

## Введение

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – неинвазивный метод, позволяющий записывать электрическую активность коры головного мозга при помощи электродов [1–3]. ЭЭГ широко используют как в медицинских [4–6], так и в популяционных исследованиях [1; 7–10]. Конвенциально принято выделять следующие диапазоны электрической активности головного мозга: 8–13 Гц – альфа-ритм; 13–30 Гц – бета-ритм; 30–200 Гц – гамма-ритм; 1–4 Гц – дельта-ритм, 4–8 Гц – тета-ритм. Более подробно ритмы активности мозга, измеряемые при помощи ЭЭГ, а также физические принципы ЭЭГ описаны в ряде работ [1–3; 11].

Несмотря на то что паттерны ЭЭГ-активности можно использовать в качестве биометрических данных для определения личности человека [12; 13], они не являются стабильными во времени и подвержены изменениям в результате взросления [1], заболеваний [14; 15], специфических воздействий [16; 17]. Данные изменения можно отслеживать как при помощи кросс-секционного дизайна – например, сравнения ЭЭГ-активности в нескольких возрастных группах [18; 19], так и с помощью лонгитюдных исследований, когда ЭЭГ-активность замеряют у одних и тех же людей в разные моменты времени. Лонгитюдные исследования обладают рядом преимуществ по сравнению с кросс-секционным дизайном: с их помощью можно определять причинно-следственные связи [20], отслеживать динамику изменений [21], исследовать нелинейные тренды [22].

Большое внимание лонгитюдному дизайну уделяется в ЭЭГ-исследованиях траекторий атипичного развития. В частности, существуют обзоры и мета-анализы лонгитюдных исследований развития аутизма [23], легких когнитивных нарушений и болезни Альцгеймера [24; 25], болезни

Паркинсона [26], постинсультной афазии [27], общего депрессивного расстройства [28; 29], зависимости от психоактивных веществ [30], эффективности электроконвульсивной терапии [31]. При этом практически нет обзоров, посвященных лонгитюдным ЭЭГ-исследованиям на типичных популяциях. Один из таких обзоров [32] посвящен возрастным изменениям ЭЭГ, записанным во время сна у типично развивающихся подростков.

Цель работы – выявить ключевые направления лонгитюдных ЭЭГ-исследований на нейротипичных популяциях, малоисследованные аспекты, а также обобщить основные результаты в рамках каждого из направлений.

## Методы и материалы

В рамках обзора были рассмотрены эмпирические статьи, написанные на английском и русском языках в период 2000–2024 гг. и опубликованные в рецензируемых научных журналах. По результатам тематического анализа удалось выделить 4 основные направления лонгитюдных исследований с использованием ЭЭГ:

1. *Возрастные изменения ЭЭГ.* Исследования, посвященные изменению электроэнцефалограммы с возрастом. Как правило, в таких исследованиях ЭЭГ записывается в состоянии покоя или во время сна. Такие исследования чаще всего проводят на младенцах, детях и подростках. Только одна статья описывала лонгитюдные изменения нейронной активности людей пожилого возраста.

2. *Изменения ЭЭГ в результате воздействия.* Исследования, посвященные изменению электроэнцефалограммы в результате влияния какого-то фактора. Большинство исследований в этой категории посвящены влиянию курсов медитаций или иных

интервенций, направленных на развитие осознанности и спокойствия. Часть исследований посвящена воздействию физических тренировок и музыкальных упражнений. Отдельную категорию составляют исследования, посвященные влиянию стресса, в том числе в раннем возрасте.

3. ЭЭГ-предикторы социально-эмоциональной сферы. Исследования, посвященные выявлению связи между особенностями электроэнцефалограммы и личностными качествами человека, такими как тревожность, стратегии избегания или достижения, интроверсия, социальная отзывчивость, чувствительность к ошибкам в социальном контексте.

4. ЭЭГ-предикторы когнитивных способностей. Исследования, посвященные выявлению связи между особенностями электроэнцефалограммы и когнитивными способностями, такими как рабочая память, способности к чтению и пониманию речи.

## Результаты

### Возрастные изменения ЭЭГ

#### Младенческий возраст

Ряд лонгитюдных исследований посвящен изменениям на электроэнцефалограмме, происходящим в первые месяцы жизни. Исследуются изменения ЭЭГ, записанной в состоянии покоя, во время сна, при предъявлении социальных стимулов (например, обращенная к младенцу речь, видео со взаимодействием людей).

В нескольких работах [33; 34] было показано, что в младенческом возрасте в состоянии покоя доминирует апериодическая активность мозга (нейронные осцилляции, которые не имеют фиксированной частоты и не повторяются регулярно), но в первые полгода жизни доля апериодической активности стремительно снижается, а мощность альфа-ритма возрастает. При этом изменения в периодической и апериодической активности происходят нелинейно [35]. Асимметричность ЭЭГ-активности (большая активность в одном полушарии по сравнению с другим) в покое относительно стабильна в период между 10 и 48 месяцами и предсказывает уровень активности ребенка в первые три года жизни [36].

Изменения происходят и на электроэнцефалограмме, записанной во время сна. Лонгитюдное исследование сна младенцев (замеры проводились в возрасте 2 недель и 2, 4, 6, 9 месяцев) показало, что процентная доля быстрого сна и мощность тета-ритма снижается с возрастом, а мощности альфа- и бета-ритмов – возрастают [37]. При этом ни в одном исследовании не была выявлена связь между изменениями ЭЭГ во время сна и психологическими характеристиками младенцев. Так, топографическое распределение медленных волн (дельта- и тета-ритмов) во время сна, записанное в возрасте 6 месяцев,

не предсказывает поведенческие особенности младенцев в 3, 6, 12 и 24 месяца [38]. Одновременно с этим топографическое распределение медленных волн у детей 2,5 лет предсказывает миелинизацию через 3 года, что свидетельствует о важности детского сна для структурного созревания мозга [39].

При предъявлении стимула (обращенная к младенцу речь) мощность тета-ритма возрастает между 4 и 11 месяцами, а мощность дельта-ритма не изменяется [40]. Кроме того, изменяется топографическое распределение тета-активности в ответ на социальные стимулы – смещение с затылочно-теменных областей на фронтально-теменные области. Возрастает функциональная связанность на уровне тета-ритмов в ответ на социальные стимулы, что может говорить о созревании «социального мозга» у младенцев к первому году жизни [41].

#### Детский и подростковый возраст

Большой пласт работ посвящен изменениям ЭЭГ, происходящим в периоды детства и подросткового возраста. В целом в них акцентируется внимание как на изменениях, так и на стабильности определенных ЭЭГ-маркеров. Так, индивидуальные паттерны ЭЭГ отличаются высокой стабильностью во времени [42; 43], что делает возможным использование ЭЭГ как биометрических данных – для установления личности человека [44]. Показатели электроэнцефалограммы в разные периоды времени демонстрируют корреляцию 0,55–0,84 в зависимости от длительности временного промежутка и выбранного метода [43]. Одновременно с этим возрастные изменения влияют на индивидуальные биометрические показатели ЭЭГ [44]. По электроэнцефалографии, записанной в состоянии покоя, возможно предсказание возрастной категории (ребенок или подросток) при помощи моделей машинного обучения с точностью более 90 % [45] и предсказание возраста с  $R^2 = 0,37$  [46]. При этом различные ЭЭГ-маркеры в разной степени подвержены возрастным изменениям. Например, асимметрия альфа-активности наиболее стабильна во времени во фронтальных регионах и не отличается стабильностью теменных и височных долях [47].

Возрастные изменения ЭЭГ имеют высокие показатели наследуемости (0,44–0,57), особенно для бета-диапазона [48]. Данные изменения также связаны со структурными изменениями мозга в период взросления, такими как изменения синаптической плотности и толщины коры мозга [1; 49].

Как и в младенчестве, в детском и подростковом возрасте снижается апериодическая активность мозга [7; 8]. Число состояний (статичных сегментов активности) увеличивается с возрастом, а средняя продолжительность одного состояния – снижается [50].

Одним из самых реплицируемых результатов является снижение активности на низких частотах и увеличение активности на высоких частотах, а также возрастание частоты альфа-пика по мере взросления, что показано в работах S. J. Segalowitz, L. Cragg, S. I. Soroko, [1; 9; 10]. Так, в промежутке между 10 и 11 годами абсолютная мощность дельта-ритма и тета-ритма снижается, в то время как относительные мощности бета-ритма и альфа2-ритма (10–12 Hz) и частота альфа-пика возрастают [9]. В лонгитюдном исследовании детей 6–18 лет с интервалом в 4 года было обнаружено, что при контроле частоты альфа-пика возрастные изменения в абсолютной и относительной мощностях альфа-ритма и абсолютной мощности бета-ритма незначительны. При этом увеличение относительной мощности бета-ритма остается существенным, так же как снижение и абсолютных, и относительных мощностей дельта-ритма и тета-ритма [51].

В работах I. G. Campbell и коллег показано, что на протяжении детского и подросткового возраста снижение мощности дельта- и тета-ритмов происходит не только в состоянии покоя, но и в фазах медленного [52–57] и быстрого [54–57] сна. Амплитуда дельта-ритма во время сна также снижается с возрастом [54]. Снижение мощности тета-ритма происходит более интенсивно и начинается в более раннем возрасте по сравнению с дельта-ритмом [58]. Со снижением дельта- и тета-ритмов во сне связана возрастающая сонливость подростков в дневное время [59]. О связи снижения дельта-ритма с половым созреванием получены противоположные данные. Одно исследование [52] показало наличие такой связи, а другое [60] выявило ее отсутствие. Кроме того, с возрастом дельта- и тета-волны распространяются на более дальние дистанции, но скорость распространения остается неизменной [61].

Установлено, что мощность сигма-ритма во время медленного сна снижается с возрастом [22; 62; 63], а частота сигма-ритма повышается [62; 63]. Сонные веретена – вспышки активности сигма-ритма во время медленного сна – также меняют свои свойства с возрастом, но данные о траекториях изменений противоречивы. Одно исследование [64] показало, что частота волн сонных веретен и их плотность возрастают, амплитуда центральной волны и продолжительность – снижаются. В другом исследовании [63] были получены противоположные данные – продолжительность и амплитуда повышаются, а частота волн снижается. Лонгитюдное исследование детей и молодежи 5–22 лет продемонстрировало, что изменение плотности и частоты сонных веретен нелинейно: 15–19 лет соответственно эти показатели возрастают, а далее – снижаются [22]. Лонгитюдное исследование детей 2–5 лет выявило,

что в 2 года сонные веретена фактически отсутствуют, а в 5 лет – заметно выражены [55]. Изменения медленных волн и сонных веретен во сне могут говорить о развитии таламокортикальной системы [53–55] и отражать последствия синаптического прунинга [56]. В целом время медленного сна в подростковом возрасте существенно снижается, а время быстрого сна – несколько увеличивается, что свидетельствует о сокращении времени, необходимого для восстановления, и также может отражать последствия синаптического прунинга [65].

Ряд исследований подчеркивает групповые и индивидуальные различия в траекториях возрастных изменений ЭЭГ. В частности, у девочек снижение дельта-ритма во сне начинается раньше, чем у мальчиков [66], и происходит более интенсивно [56], что является признаком более раннего синаптического прунинга у девочек. С другой стороны, у мальчиков происходят более выраженные возрастные изменения в плотности сонных веретен [22]. Лонгитюдное исследование ЭЭГ, записанной в состоянии покоя, у детей 8–17 лет позволило выявить 4 типа ЭЭГ по частотному составу: быстро-синхронный, полиморфно-синхронный, полиморфно-асинхронный и медленно-синхронный. Процент медленных волн и абсолютная мощность дельта-ритма снижалась с возрастом у всех типов. У быстро-синхронного типа также снижалась мощность тета-ритма и альфа-1 ритма, а мощность альфа-2 ритма в затылочной и теменной областях увеличивалась. У полиморфно-синхронного типа возрастали мощности альфа-1 ритма и альфа-2 ритма. У полиморфно-асинхронного типа снижалась мощность во всех частотных диапазонах, а у медленно-синхронного типа возрастала мощность в альфа-2 диапазоне [10].

Часть исследований посвящена развитию паттернов синхронизации ЭЭГ-ритмов по мере взросления. Было показано, что в период детства возрастает ЭЭГ-когерентность (степень синхронизации электрической активности) в состоянии покоя во фронтальных [67] и височных [68] областях, снижается ЭЭГ-когерентность между удаленными участками мозга [67]. Изменения происходят скачкообразно, что связано с генетической обусловленностью: с возрастом на ЭЭГ-когерентность начинают влиять новые гены [67]. ЭЭГ-когерентность, записанная во время сна, возрастает на протяжении детского и подросткового возраста [68; 69]. В период между 7 и 10 годами увеличивается синхронизация активности мозга на различных частотах, т. е. разные частоты начинают больше совпадать с друг другом по fazam [70]. К тому же в этом возрасте усиливается функциональная связанныность между затылочными и височными областями коры и ослабляется функциональная связанныность между соседними регионами фронтальных

областей. Кроме этого, увеличивается функциональная связанность внутри сети пассивного режима и возрастает сегрегация данной сети от других сетей в частотах альфа-диапазона. Эти изменения связаны с развитием способности целенаправленно контролировать свою деятельность [71].

### **Пожилой возраст**

Было найдено только одно исследование, посвященное возрастным изменениям ЭЭГ активности в пожилом возрасте. Оно позволило установить, что в пожилом возрасте лонгитюдные изменения ЭЭГ-активности во время сна значительно варьируют между индивидами (трудно выделить общие тренды), при этом изменения ЭЭГ-маркеров REM и NREM стадий сна высоко коррелируют [72].

### **Изменения ЭЭГ после воздействия**

Другое направление лонгитюдных ЭЭГ-исследований фокусируется на изменениях электроэнцефалограммы, возникающих под воздействием внешних факторов. Как правило, длительность таких исследований не превышает одного года, в то время как лонгитюдные исследования, посвященные возрастным изменениям в детском и подростковом возрасте, отслеживают изменения, происходящие на протяжении нескольких лет.

### **Медитации и тренинги**

Больше всего исследований в данной категории посвящено влиянию интервенций, направленных на повышение уровня осознанности и спокойствия, таких как медитации и тренинги. В частности, в работах M. Saggar, A. P. Zanesco и коллег было показано, что после курса медитаций изменяется таламокортикальная активность мозга [73], наблюдается снижение мощности бета-ритма в передне-центральной и затылочной областях головы как во время медитации [74], так и в состоянии покоя [75]. В состоянии покоя наблюдается незначительное снижение мощности альфа-ритма и частоты альфа-пика [75], снижается хаотичность (энтропия) активности мозга [76]. Другое исследование выявило, что после 8 недель интервенции, направленной на снижение стресса, участники демонстрировали повышение мощности альфа-ритма в затылочных и фронтальных областях. Особенно это было заметно во время выполнения заданий, призванных вызвать стресс, что может говорить о повышении стрессоустойчивости участников [77].

После медитаций также снижается продолжительность и мощность ЭЭГ-микросостояний (кратковременных, устойчивых паттернов электрической активности). Эти изменения коррелируют с возрастанием субъективной оценки спокойствия

и осознанности в повседневной жизни [78]. Такие же изменения (снижение продолжительности и мощности микросостояний) наблюдались у солдат после 8-недельного тренинга позитивного мышления [79].

Медитации и тренинги вызывают изменения ЭЭГ-активности не только в состоянии покоя, но и при выполнении когнитивных тестов. Так, установлено, что после курса медитаций изменяется активность мозга при выполнении задачи Струпа: повышается активность в левой медиальной и латеральной затылочно-височных областях при предъявлении конгруэнтного стимула [80]. Также после курса медитаций во время выполнения задач на рабочую память возрастила мощность тета-ритма в правой фронтальной и левой теменной областях. Эти изменения положительно коррелировали с баллами по опроснику осознанности [81].

### **Музыка и физическая активность**

Ряд исследований посвящен изменениям, вызванным занятиями музыкой или спортом. При этом цели и выводы таких исследований достаточно разрознены, что не позволяет выявить общие закономерности. Например, M. Bangert и E. O. Altenmüller обнаружили, что после обучения игре на пианино изменяются паттерны активности в передних отделах правого полушария мозга при выполнении заданий на распознавание звуков [16]. S. M. Carpentier, S. Moreno и A. R. McIntosh зафиксировали следующее: кратковременная музыкальная тренировка (один месяц) увеличивает разнообразие состояний нейронных сетей при выполнении музыкальных заданий [82]. Еще в одной публикации сообщается, что после выполнения музыкальных заданий в паре повышалась межличностная синхронизация ЭЭГ-активности на уровне дельта-ритма [83].

Два лонгитюдных исследования были посвящены изменениям после физической активности. Одно из них [17] показало, что после физических тренировок, скомбинированных с нейрофидбэком, улучшается функциональная связанность между центральной исполнительной сетью и сетью значимости. Другое [84] выявило кратковременное снижение мощности альфа- и дельта-ритмов во фронтальных областях после интенсивной физической активности (эффект исчезает через несколько недель).

### **Негативные факторы**

Несколько исследований посвящены воздействию негативных факторов – таких как недостаточный или некачественный сон, стресс, высокая утомленность, употребление алкоголя – на изменения электроэнцефалограммы. Было показано, что после четырех ночей с ограниченным количеством сна снижается мощность альфа-ритма во время сна [85] и мощность

сигма-ритма в медленной фазе сна [86], что сопровождается повышением дневной сонливости [53]. Некачественный сон, измеренный при помощи ЭЭГ, в 5,5 лет предсказывает некачественный сон и психологические трудности через 1 год [87].

S. Yousof и соавторы сравнивали ЭЭГ-активность во время выполнения задачи на рабочую память у студентов до и во время экзаменационного периода – периода высокого уровня стресса [88]. Значимые различия не были обнаружены. Т. Т. N. Do и коллеги установили, что общая функциональная связанность положительно связана с уровнем когнитивной нагрузки в нормальном состоянии, но отрицательно связана – в состоянии утомленности [89].

Два исследования были посвящены употреблению алкоголя в подростковом возрасте. Одно из них [90] показало, что употребление алкоголя отрицательно связано с мощностью тета-ритма при выполнении задачи Фланкера, данная связь объясняется преимущественно генетическими факторами. Другое [57] выявило связь употребления алкоголя с уменьшением процентной доли быстрого сна, увеличением времени засыпания и уменьшением общего времени сна.

### **Воздействие в раннем возрасте**

Три работы были посвящены влиянию на ЭЭГ воздействий, имевших место в младенческом возрасте. A. Brandes-Aitken и другие обнаружили, что материнский стресс, измеренный как уровень кортизола, связан с увеличением относительной мощности тета-ритма и снижением относительной мощности бета-ритма во фронтальных долях у младенцев между 3 и 15 месяцами [91].

C. Stamoulis и коллеги выявили, что у младенцев, оставшихся без попечения родителей, к 8 годам обнаруживались аномалии функциональной связанности: чрезмерно высокая функциональная связанность в затылочно-теменной сети и недостаточная функциональная связанность между левыми височными и билатеральными регионами [92]. Обратная ситуация – высокое внимание матери к младенцу – связана с большей межличностной синхронизацией ребенка и матери в правой височно-лобной сети во время взаимодействия [93].

### **Нейростимуляция и когнитивные тренировки**

Две работы посвящены изменениям ЭЭГ, вызванным нейростимуляцией. По мнению K. T. Jones и других ученых, транскраниальная стимуляция переменным током способна увеличить функциональную связанность при выполнении заданий на когнитивный контроль и повысить успешность выполнения этого задания в пожилом возрасте [94]. Другое исследование [95] показало, что после транскраниальной стимуляции,

совмещенной с тренировкой рабочей памяти, наблюдалось снижение мощности альфа-ритма в затылочных долях при выполнении заданий на рабочую память. В совокупности с поведенческими данными (улучшение выполнения задания) эти результаты свидетельствуют о том, что совмещение стимуляции с тренировкой повысило эффективность удержания объектов в рабочей памяти. Кроме этого, в работе F. Pugin и коллег [96] выявлено увеличение мощности медленных волн (дельта- и тета-ритмов) в левой фронтально-височной области во время сна после трех недель тренировки рабочей памяти.

### **ЭЭГ-предикторы социально-эмоциональной сферы**

Третье направление лонгитюдных исследований посвящено тому, как показатели ЭЭГ, записанные в более раннем возрасте, могут предсказывать личностные особенности (например, тревожность, умение регулировать эмоции, стратегии поведения в обществе) в более позднем возрасте или, напротив, личностные особенности в раннем возрасте предсказывают показатели ЭЭГ в более позднем возрасте.

Ряд исследований показывает значимость асимметрии активации во фронтальных областях, особенно на уровне альфа-ритма как предиктора личностных особенностей. Так, большая активация в правых фронтальных областях, по сравнению с левыми, зарегистрированная в раннем детстве (4,5 года), связана с высокой тревожностью и трудностями в регулировании эмоций в 9 лет [97]. Дети 6–7 лет с более высокой альфа-активностью правого полушария спустя два года демонстрировали выраженные стратегии избегания в социальной и эмоциональной сфере, тогда как дети с более высокой альфа-активностью левого полушария – стратегии достижения [98]. У детей, демонстрирующих торможение поведения в 2–3 года, более высокая альфа-активность правого полушария в 12 лет связана с высокой чувствительностью к ошибкам в социальном контексте [99]. У молодых людей, которые демонстрировали повышенную чувствительность к социальным проблемам, стеснительность оказалась связана с более высокой активацией правой фронтальной коры 10 лет спустя [100]. Дети с высокой негативной эмоциональностью и низкой позитивной эмоциональностью в 3 года демонстрируют снижение относительной активации левой фронтальной коры к 6 годам [101]. Высокая реактивность в 4 месяца и пугливость в 14 и 21 месяц связана с более высокой мощностью альфа-ритма в правой фронтальной коре по сравнению с левой в 10 лет [102]. Еще одно исследование показало, что высокая пугливость в 36 месяцев предсказывает асимметрию ЭЭГ-активности в 48 месяцев, но не наоборот [36].

J. Не и соавторы также выявили, что асимметрия активации во фронтальных долях модерирует взаимосвязь между агрессивностью в 4 месяца и способностью к ингибиторному контролю в 9 месяцев: для младенцев с более высокой активностью правого полушария наблюдалась выраженная отрицательная связь, а для младенцев с более высокой активностью левого полушария связи не наблюдалось [103]. A. P. R. Broomell, J. Savla и M. A. Bell установили, что высокая ЭЭГ-когерентность в правой фронтально-височной области по сравнению с левой в младенческом возрасте предсказывает меньшее торможение поведения в 2 года, что, в свою очередь, предсказывает меньшую социальную отзывчивость в 4 года [104].

Некоторые исследования фокусируются на согласованности различных ритмов ЭЭГ-активности как предикторе социально-эмоциональных качеств. Так, дети с высокой и стабильной социальной тревожностью имели более высокие корреляции дельта- и бета-ритмов в состоянии покоя, записанные годом ранее [105]. Другое исследование показало, что высокая корреляция дельта- и бета-ритмов в 5–7 лет связана с адаптивными стратегиями регуляции эмоций два года спустя [106]. Корреляция дельта- и бета-ритмов может отражать функциональную согласованность кортикалных и субкортикалных нейронных цепей, которая важна для эмоциональной регуляции [106]. Более высокая фазовая синхронизация бета- и тета-ритмов в состоянии покоя 12–15 лет предсказывает более низкий уровень психологического дистресса и более высокий уровень субъективного благополучия к моменту окончания школы [107]. Высокая синхронизация различных частот (*cross-frequency coupling*) в областях мозга, ассоциированных с эмоциями, вниманием и обработкой социальной информации, связана с интроверсией в период 7–10 лет [70].

Еще в двух исследованиях была выявлена роль мощности альфа-ритма как предиктора социальных и эмоциональных качеств. Мощность альфа-ритма во фронтальных долях в детстве оказалась положительно связана с уровнем агрессии в подростковом возрасте у мальчиков, и эта связь полностью объясняется генетическими факторами [108]. В другом исследовании [109] испытуемые, отмечающие высокую значимость религии и духовности, демонстрировали более высокую мощность альфа-ритма 10 лет спустя по сравнению с контрольной группой.

В работе G. G. Knyazev и других выявлена важность баланса активности различных сетей мозга: изменение баланса между активностью сети пассивного режима работы мозга и центральной исполнительной сети в альфа-диапазоне между 7 и 8 годами предсказывает положительные личностные качества

ребенка по оценке родителей [71]. Наконец, низкое качество сна и более долгое засыпание, измеренное при помощи электроэнцефалограммы в 5 лет, предсказывает жестокость и низкий уровень эмпатии в 14 лет [110].

### ЭЭГ-предикторы когнитивных и метакогнитивных навыков

Четвертое направление исследований фокусируется на изучении лонгитюдных взаимосвязей между особенностями ЭЭГ и когнитивными и метакогнитивными навыками. Ряд исследований показывает наличие ЭЭГ-предикторов когнитивных способностей уже в младенческом возрасте. В частности, ЭЭГ-активность в левых фронтальных и центральных областях коры, записанная в 14 месяцев, предсказывает способность младенца к поддержанию совместного внимания в 18 месяцев [111; 112], мощность в диапазонах 4–6 Гц и 6–9 Гц во фронтальных областях коры в 14 месяцев предсказывает способность младенцев к протодекларативному указанию в 18 месяцев [113], а более высокая мощность тета-ритма во время концентрации внимания у младенцев в 3 месяца предсказывает более высокую способность к запоминанию объектов в 9 месяцев [114].

Возрастные изменения, происходящие в младенческом возрасте, также влияют на связь между особенностями ЭЭГ и когнитивными навыками. Например, изменение активности мозга при выполнении заданий на рабочую память по сравнению с состоянием покоя предсказывает объем рабочей памяти у младенцев в возрасте 10 месяцев, но не предсказывает – у младенцев в возрасте 5 месяцев. А увеличение ЭЭГ-когерентности при выполнении задания на рабочую память по сравнению с состоянием покоя более локализовано у младенцев 10 месяцев по сравнению с младенцами 5 месяцев [115]. Еще одно исследование [116] выявило, что при выполнении задания на рабочую память у младенцев менялась мощность электрической активности во всей коре мозга, а у детей 4,5 лет – только во фронтальной медиальной коре. ЭЭГ-когерентность у младенцев изменялась для всех пар электродов, а у детей 4,5 лет – только для пар электродов, расположенных в области медиальной фронтальной / задней височной коры, и для пар, расположенных в области медиальной фронтальной / затылочной коры. Данные результаты свидетельствуют о локализации активности, связанной с рабочей памятью, по мере взросления [116].

Исследования детей более старшего возраста демонстрируют наличие ЭЭГ-предикторов для способности к чтению. Так, дошкольники с более высокой синхронизацией речи и активности мозга

(показатель того, насколько мозг отслеживает речь) на уровне дельта-ритма в правом полушарии показывали более высокие результаты по чтению после окончания первого класса [117]. А дети, демонстрирующие трудности в чтении в 3 классе, имели более высокую амплитуду альфа-ритма и более низкую амплитуду дельта-ритма в состоянии покоя в возрасте 3 лет [118]. Незрелость ЭЭГ-ритмов в 7 лет предсказывает трудности в освоении чтения и речевых навыков [119]. Помимо этого, одно исследование показало, что ЭЭГ в состоянии покоя, записанная в 4 года, предсказывает активность мозга при выполнении заданий на *теорию сознания* (*theory of mind*) в дорсальной медиальной префронтальной коре [120].

Два исследования касаются ЭЭГ-предикторов когнитивных способностей пожилых людей. Одно из них [121] выявило связь между частотой альфа-ритма и экспонентой апериодической активности в состоянии покоя и снижением когнитивных способностей через 10 лет у людей в зрелом и старческом возрасте. Другое [122] установило, что увеличение фазовой синхронизации тета- и гамма-ритмов связано с улучшением выполнения заданий на рабочую память у пожилых людей.

## Обсуждение

Подавляющее большинство исследований посвящено возрастным изменениям ЭЭГ, особенно в младенческом, детском и подростковом возрасте. В этой области получен ряд широко реплицируемых результатов, таких как снижение апериодической активности мозга [7; 8; 33; 34; 36], снижение активности на низких частотах и повышение активности на высоких частотах по мере взросления [1; 9; 10; 51–57]. При этом некоторые исследования [63; 64] противоречат друг другу касательно траекторий возрастных изменений характеристик сонных веретен. Возможными объяснениями противоречий могут быть нелинейные паттерны изменений – возрастания показателей в одном возрастном диапазоне и снижения в другом [22], а также наличие различных сценариев в зависимости от индивидуальных особенностей [10]. Практически отсутствуют лонгитюдные ЭЭГ-исследования, посвященные процессам здорового старения мозга. Было найдено только одно исследование здоровых пожилых людей [72], в котором не удалось выявить устойчивые паттерны изменений.

В исследованиях, в которых изучаются различные воздействия на ЭЭГ, особое внимание уделяется медитациям и тренингам, направленным на развитие осознанности и улучшения качества жизни. Из-за того, что исследования в этой области фокусируются на разных параметрах ЭЭГ,

обобщить результаты затруднительно. Как минимум два исследования [78; 79] показывают снижение продолжительности и мощности микросостояний на ЭЭГ после проведенного воздействия. В целом результаты демонстрируют эффективность интервенций на психофизиологическом и поведенческом уровне [77; 79; 81]. Отдельные исследования посвящены влиянию на ЭЭГ образа жизни, эмоциональных состояний, воздействий в раннем детстве. Малое количество исследований, различные цели и дизайн не позволяют сделать общие выводы.

Исследования, направленные на выявление ЭЭГ-предикторов социальных и эмоциональных черт, подчеркивают связь большей активации правой фронтальной коры по сравнению с левой и ряда неадаптивных личностных особенностей, таких как общая и социальная тревожность, стратегии избегания [36; 97; 98; 101; 102]. Особенно выраженной эта связь является для детей и подростков, имеющих поведенческие предрасположенности к развитию данных признаков [99; 100]. Ряд исследований посвящен влиянию синхронизации различных ритмов и различных участков мозга, а также мощности альфа-ритма на социальные и эмоциональные качества, но различия в исследуемых фенотипах и дизайнах исследований не позволяют обобщить результаты. В частности, два исследования, сфокусированных на корреляции дельта- и бета-ритмов, показали противоположные результаты: в одном из них сильная связь коррелирует с высокой тревожностью [105], в другом – с адаптивными стратегиями регулирования эмоций [106].

Исследования, направленные на выявление ЭЭГ-предикторов когнитивных черт, разнородны по исследуемым фенотипам, параметрам ЭЭГ и возрасту испытуемых. В целом исследования свидетельствуют о большей локализации областей мозга, активирующихся при выполнении когнитивных задач, с возрастом [115; 116]. Отметим, что исследования проводились с участием младенцев, детей младшего возраста, взрослых и пожилых людей. Не было обнаружено лонгитюдных ЭЭГ-исследований когнитивных способностей подростков. Три работы [117–119] были посвящены ЭЭГ-предикторам чтения у детей дошкольного и младшего школьного возраста, но обобщить результаты невозможно из-за разных исследуемых параметров ЭЭГ.

## Заключение

Данный обзор выявляет недостаток знания о траекториях развития нейронных механизмов когнитивных способностей подростков школьного возраста, несмотря на то что подростковый возраст – это период активного развития когнитивных способностей. При этом ряд кросс-секционных

исследований показывает актуальность подобных работ. В частности, были выявлены нейронные корреляты математической одаренности [123] и рабочей памяти [124] подростков. Сравнение нейронных механизмов рабочей памяти у детей, взрослых и подростков выявило как общие принципы, так возрастную специфику [124]. Необходимы лонгитюдные ЭЭГ-исследования для понимания динамики изменений нейронных механизмов когнитивных способностей в подростковом возрасте. Такие исследования в совокупности с существующими исследованиями, проведенными на младенческих и детских выборках, а также выборках людей пожилого возраста,

помогут понять, как нейронные механизмы, лежащие в основе когнитивных способностей, развиваются на протяжении жизни и обуславливают возрастные изменения в успешности выполнения когнитивных заданий.

**Конфликт интересов:** Автор заявил об отсутствии потенциальных конфликтов интересов в отношении исследования, авторства и / или публикации данной статьи.

**Conflict of interest:** The author declared no potential conflict of interest in relation to the research, authorship, and/or publication of this article.

## Литература / References

1. Segalowitz S. J., Santesso D. L., Jetha M. K. Electrophysiological changes during adolescence: A review. *Brain and Cognition*, 2010, 72(1): 86–100. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.10.003>
2. Zhang H., Zhou Q. Q., Chen H., Hu X. Q., Li W. G., Bai Y., Han J. X., Wang Y., Liang Z. H., Chen D., Cong F. Y., Yan J. Q., Li X. L. The applied principles of EEG analysis methods in neuroscience and clinical neurology. *Military Medical Research*, 2023, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40779-023-00502-7>
3. Müller-Putz G. R. Electroencephalography. *Handbook of Clinical Neurology*, 2020, 168: 249–262. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63934-9.00018-4>
4. Seneviratne U., D'Souza W. J. Ambulatory EEG. *Handbook of clinical neurology*, 2019, 160: 161–170. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64032-1.00010-2>
5. Romagnoli S., Franchi F., Ricci Z. Processed EEG monitoring for anesthesia and intensive care practice. *Minerva Anestesiologica*, 2019, 85(11): 1219–1230. <https://doi.org/10.23736/S0375-9393.19.13478-5>
6. Omejc N., Rojc B., Battaglini P. P., Marusic U. Review of the therapeutic neurofeedback method using electroencephalography: EEG Neurofeedback. *Bosnian Journal of Basic Medical Sciences*, 2019, 19(3): 213–220. <https://doi.org/10.17305/bjbms.2018.3785>
7. McSweeney M., Morales S., Valadez E. A., Buzzell G. A., Fox N. A. Longitudinal age- and sex-related change in background aperiodic activity during early adolescence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2021, 52. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2021.101035>
8. McKeon S. D., Perica M. I., Parr A. C., Calabro F. J., Foran W., Hetherington H., Moon C.-H., Luna B. Aperiodic EEG and 7T MRSI evidence for maturation of E/I balance supporting the development of working memory through adolescence. *bioRxiv*, 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.09.06.556453>
9. Cragg L., Kovacevic N., McIntosh A. R., Poulsen C., Martinu K., Leonard G., Paus T. Maturation of EEG power spectra in early adolescence: A longitudinal study. *Developmental Science*, 2011, 14(5): 935–943. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01031.x>
10. Soroko S. I., Shemyakina N. V., Nagornova Z. V., Bekshaev S. S. Longitudinal study of EEG frequency maturation and power changes in children on the Russian North. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 2014, 38: 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2014.08.012>
11. Jackson A. F., Bolger D. J. The neurophysiological bases of EEG and EEG measurement: A review for the rest of us. *Psychophysiology*, 2014, 51(11): 1061–1071. <https://doi.org/10.1111/psyp.12283>
12. Chan H. L., Kuo P. C., Cheng C. Y., Chen Y. S. Challenges and future perspectives on electroencephalogram-based biometrics in person recognition. *Frontiers in Neuroinformatics*, 2018, 12. <https://doi.org/10.3389/fninf.2018.00066>
13. Zhong W., An X., Di Y., Zhang L., Ming D. Review on identity feature extraction methods based on electroencephalogram signals. *Journal of Biomedical Engineering*, 2021, 38(6): 1203–1210. <https://doi.org/10.7507/1001-5515.202102057>
14. Ahmadieh H., Ghassemi F. Assessing the effects of Alzheimer disease on EEG signals using the entropy measure: A meta-analysis. *Basic and Clinical Neuroscience*, 2022, 13(2): 153–164. <https://doi.org/10.32598/bcn.2021.1144.3>
15. Smailovic U., Jelic V. Neurophysiological markers of Alzheimer's disease: Quantitative EEG approach. *Neurology and Therapy*, 2019, 8: 37–55. <https://doi.org/10.1007/s40120-019-00169-0>
16. Bangert M., Altenmüller E. O. Mapping perception to action in piano practice: A longitudinal DC-EEG study. *BMC Neuroscience*, 2003, 4. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-4-26>

17. Shaw S. B., Levy Y., Mizzi A., Herman G., McKinnon M. C., Heisz J. J., Becker S. Combined aerobic exercise and neurofeedback lead to improved task-relevant intrinsic network synchrony. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2022, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.838614>
18. Kavčič A., Demšar J., Georgiev D., Bon J., Soltirovska-Šalamon A. Age-related changes and sex-related differences of functional brain networks in childhood: A high-density EEG study. *Clinical Neurophysiology*, 2023, 150: 216–226. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2023.03.357>
19. Kroupi E., JH Jones E., Oakley B., Buitelaar J., Charman T., Loth E., Murphy D., Soria-Frisch A. Age-related differences in delta-beta phase-amplitude coupling in autistic individuals. *Clinical Neurophysiology*, 2024, 167: 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2024.08.010>
20. Raudenbush S. W. Comparing personal trajectories and drawing causal inferences from longitudinal data. *Annual Review of Psychology*, 2001, 52: 501–525. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.52.1.501>
21. Boland J., Telesca D., Sugar C., Jeste S., Goldbeck C., Senturk D. A study of longitudinal trends in time-frequency transformations of EEG data during a learning experiment. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2022, 167. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2021.107367>
22. Ricci A., He F., Calhoun S. L., Fang J., Vgontzas A. N., Liao D., Bixler E. O., Younes M., Fernandez-Mendoza J. Sex and pubertal differences in the maturational trajectories of sleep spindles in the transition from childhood to adolescence: A population-based study. *eNeuro*, 2021, 8(4). <https://doi.org/10.1523/eneuro.0257-21.2021>
23. Dawson G., Rieder A. D., Johnson M. H. Prediction of autism in infants: Progress and challenges. *The Lancet Neurology*, 2023, 22(3): 244–254. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(22\)00407-0](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(22)00407-0)
24. Giannakopoulos P., Missonnier P., Gold G., Michon A. Electrophysiological markers of rapid cognitive decline in mild cognitive impairment. *Frontiers of Neurology and Neuroscience*, 2009, 24: 39–46. <https://doi.org/10.1159/000197898>
25. Jeong J. EEG dynamics in patients with Alzheimer's disease. *Clinical Neurophysiology*, 2004, 115(7): 1490–1505. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2004.01.001>
26. Dijkstra F., de Volder I., Viaene M., Cras P., Crosiers D. Polysomnographic predictors of sleep, motor, and cognitive dysfunction progression in Parkinson's disease. *Current Neurology and Neuroscience Reports*, 2022, 22(10): 657–674. <https://doi.org/10.1007/s11910-022-01226-2>
27. Arheix-Parras S., Glize B., Guehl D., Python G. Electrophysiological changes in patients with post-stroke aphasia: A systematic review. *Brain Topography*, 2023, 36: 135–171. <https://doi.org/10.1007/s10548-023-00941-4>
28. Watts D., Pulice R. F., Reilly J., Brunoni A. R., Kapczinski F., Passos I. C. Predicting treatment response using EEG in major depressive disorder: A machine-learning meta-analysis. *Translational Psychiatry*, 2022, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41398-022-02064-z>
29. Jacobs R. H., Orr J. L., Gowins J. R., Forbes E. E., Langenecker S. A. Biomarkers of intergenerational risk for depression: A review of mechanisms in longitudinal high-risk (LHR) studies. *Journal of Affective Disorders*, 2015, 175: 494–506. <https://doi.org/10.1016/j.jad.2015.01.038>
30. Bel-Bahar T. S., Khan A. A., Shaik R. B., Parvaz M. A. A scoping review of electroencephalographic (EEG) markers for tracking neurophysiological changes and predicting outcomes in substance use disorder treatment. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2022, 16. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2022.995534>
31. Abbott C. C., Gallegos P., Rediske N., Lemke N. T., Quinn D. K. A review of longitudinal electroconvulsive therapy: Neuroimaging investigations. *Journal of Geriatric Psychiatry and Neurology*, 2014, 27(1): 33–46. <https://doi.org/10.1177/0891988713516542>
32. Feinberg I., Campbell I. G. Sleep EEG changes during adolescence: An index of a fundamental brain reorganization. *Brain and Cognition*, 2010, 72(1): 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2009.09.008>
33. Schawronkow N., Voytek B. Longitudinal changes in aperiodic and periodic activity in electrophysiological recordings in the first seven months of life. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2021, 47. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100895>
34. Rico-Picó J., Moyano S., Conejero Á., Hoyo Á., Ballesteros-Duperón M. Á., Rueda M. R. Early development of electrophysiological activity: Contribution of periodic and aperiodic components of the EEG signal. *Psychophysiology*, 2023, 60(11). <https://doi.org/10.1111/psyp.14360>
35. Wilkinson C. L., Yankowitz L. D., Chao J. Y., Gutiérrez R., Rhoades J. L., Shinnar S., Purdon P. L., Nelson C. A. Developmental trajectories of EEG aperiodic and periodic components in children 2–44 months of age. *Nature Communications*, 2024, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50204-4>
36. Howarth G. Z., Fettig N. B., Curby T. W., Bell M. A. Frontal electroencephalogram asymmetry and temperament across infancy and early childhood: An exploration of stability and bidirectional relations. *Child Development*, 2016, 87(2): 465–476. <https://doi.org/10.1111/cdev.12466>

37. Jenni O. G., Borbély A. A., Achermann P. Development of the nocturnal sleep electroencephalogram in human infants. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2004, 286(3): R528–R538. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00503.2003>
38. Beaugrand M., Jaramillo V., Markovic A., Huber R., Kohler M., Schoch S. F., Kurth S. Lack of association between behavioral development and simplified topographical markers of the sleep EEG in infancy. *Neurobiology of Sleep and Circadian Rhythms*, 2023, 15. <https://doi.org/10.1016/j.nbscr.2023.100098>
39. LeBourgeois M. K., Dean D. C., Deoni S. C. L., Kohler M., Kurth S. A simple sleep EEG marker in childhood predicts brain myelin 3.5 years later. *NeuroImage*, 2019, 199: 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2019.05.072>
40. Attaheri A., Choisdealbha Á. N., Di Liberto G. M., Rocha S., Brusini P., Mead N., Olawole-Scott H., Boutris P., Gibbon S., Williams I., Grey C., Flanagan S., Goswami U. Delta- and theta-band cortical tracking and phase-amplitude coupling to sung speech by infants. *NeuroImage*, 2022, 247. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118698>
41. Van der Velde B., White T., Kemner C. The emergence of a theta social brain network during infancy. *NeuroImage*, 2021, 240. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118298>
42. Lustenberger C., Mouthon A. L., Tesler N., Kurth S., Ringli M., Buchmann A., Jenni O. G., Huber R. Developmental trajectories of EEG sleep slow wave activity as a marker for motor skill development during adolescence: A pilot study. *Developmental Psychobiology*, 2017, 59(1): 5–14. <https://doi.org/10.1002/dev.21446>
43. Dünki R. M., Schmid G. B., Stassen H. H. Intraindividual specificity and stability of human EEG: Comparing a linear vs a nonlinear approach. *Methods of Information in Medicine*, 2000, 39(1): 78–82. <https://doi.org/10.1055/s-0038-1634249>
44. Maiorana E., Campisi P. Longitudinal evaluation of EEG-based biometric recognition. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2018, 13(5): 1123–1138. <https://doi.org/10.1109/tifs.2017.2778010>
45. Vandenbosch M. M. L. J. Z., Van 't Ent D., Boomsma D. I., Anokhin A. P., Smit D. J. A. EEG-based age-prediction models as stable and heritable indicators of brain maturational level in children and adolescents. *Human Brain Mapping*, 2019, 40(6): 1919–1926. <https://doi.org/10.1002/hbm.24501>
46. Al Zoubi O., Ki Wong C., Kuplicki R. T., Yeh H., Mayeli A., Refai H., Paulus M., Bodurka J. Predicting age from brain EEG signals – A machine learning approach. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 2018, 10. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2018.00184>
47. Müller B. C. N., Kühn-Popp N., Meinhardt J., Sodian B., Paulus M. Long-term stability in children's frontal EEG alpha asymmetry between 14-months and 83-months. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 2015, 41(1): 110–114. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2015.01.002>
48. Markovic A., Achermann P., Rusterholz T., Tarokh L. Heritability of sleep EEG topography in adolescence: Results from a longitudinal twin study. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 3–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25590-7>
49. Feinberg I., Campbell I. G. Longitudinal sleep EEG trajectories indicate complex patterns of adolescent brain maturation. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2013, 304(4): R296–R303. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00422.2012>
50. Vakorin V. A., McIntosh A. R., Mišić B., Krakovska O., Poulsen C., Martinu K., Paus T. Exploring age-related changes in dynamical non-stationarity in electroencephalographic signals during early adolescence. *PLOS ONE*, 2013, 8(3). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0057217>
51. Gmehlin D., Thomas C., Weisbrod M., Walther S., Pfüller U., Resch F., Oelkers-Ax R. Individual analysis of EEG background activity within school age: Impact of age and sex within a longitudinal data set. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 2011, 29(2): 163–170. <https://doi.org/10.1016/j.ijdevneu.2010.11.005>
52. Campbell I. G., Darchia N., Higgins L. M., Dykan I. V., Davis N. M., de Bie E., Feinberg I. Adolescent changes in homeostatic regulation of EEG activity in the delta and theta frequency bands during NREM sleep. *Sleep*, 2011, 34(1): 83–91. <https://doi.org/10.1093/sleep/34.1.83>
53. Campbell I. G., Van Dongen H. P. A., Gainer M., Karmouta E., Feinberg I. Differential and interacting effects of age and sleep restriction on daytime sleepiness and vigilance in adolescence: A longitudinal study. *Sleep*, 2018, 41(12): 1–8. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsy177>
54. Baker F. C., Turlington S. R., Colrain I. Developmental changes in the sleep electroencephalogram of adolescent boys and girls. *Journal of Sleep Research*, 2011, 21(1): 59–67. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2869.2011.00930.x>
55. Olbrich E., Rusterholz T., LeBourgeois M. K., Achermann P. Developmental changes in sleep oscillations during early childhood. *Neural Plasticity*, 2017, (1): 1–12. <https://doi.org/10.1155/2017/6160959>
56. Ricci A., He F., Fang J., Calhoun S. L., Vgontzas A. N., Liao D., Younes M., Bixler E. O., Fernandez-Mendoza J. Maturational trajectories of non-rapid eye movement slow wave activity and odds ratio product in a population-based sample of youth. *Sleep Medicine*, 2021, 83: 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.sleep.2021.05.002>

57. Kiss O., Goldstone A., de Zambotti M., Yüksel D., Hasler B. P., Franzen P. L., Brown S. A., De Bellis M. D., Nagel B. J., Nooner K. B., Tapert S. F., Colrain I. M., Clark D. B., Baker F. C. Effects of emerging alcohol use on developmental trajectories of functional sleep measures in adolescents. *Sleep*, 2023, 46(9): 1–14. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsad113>
58. Campbell I. G., Feinberg I. Longitudinal trajectories of non-rapid eye movement delta and theta EEG as indicators of adolescent brain maturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(13): 5177–5180. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812947106>
59. Campbell I. G., Higgins L. M., Trinidad J. M., Richardson P., Feinberg I. The increase in longitudinally measured sleepiness across adolescence is related to the maturational decline in low-frequency EEG power. *Sleep*, 2007, 30(12): 1677–1687. <https://doi.org/10.1093/sleep/30.12.1677>
60. Feinberg I., Higgins L. M., Khaw W. Y., Campbell I. G. The adolescent decline of NREM delta, an indicator of brain maturation, is linked to age and sex but not to pubertal stage. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 2006, 291(6): R1724–R1729. <https://doi.org/10.1152/ajpregu.00293.2006>
61. Kurth S., Riedner B. A., Dean D. C., O'Muircheartaigh J., Huber R., Jenni O. G., Deoni S. C. L., LeBourgeois M. K. Traveling slow oscillations during sleep: A marker of brain connectivity in childhood. *Sleep*, 2017, 40(9): 1–10. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsx121>
62. Campbell I. G., Kraus A. M., Burright C. S., Feinberg I. Restricting time in bed in early adolescence reduces both NREM and REM sleep but does not increase slow-wave EEG. *Sleep*, 2016, 39(9): 1663–1670. <https://doi.org/10.5665/sleep.6088>
63. McClain I. J., Lustenberger C., Achermann P., Lassonde J. M., Kurth S., LeBourgeois M. K. Developmental changes in sleep spindle characteristics and sigma power across early childhood. *Neural Plasticity*, 2016, (1): 1–9. <https://doi.org/10.1155/2016/3670951>
64. Zhang Z. Y., Campbell I. G., Dhayagude P., Espino H. C., Feinberg I. Longitudinal analysis of sleep spindle maturation from childhood through late adolescence. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 2021, 41(19): 4253–4261. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2370-20.2021>
65. Campbell I. G., Feinberg I. Maturational patterns of sigma frequency power across childhood and adolescence: A longitudinal study. *Sleep*, 2016, 39(1): 193–201. <https://doi.org/10.5665/sleep.5346>
66. Campbell I. G., Darchia N., Khaw W. Y., Higgins L. M., Feinberg I. Sleep EEG evidence of sex differences in adolescent brain maturation. *Sleep*, 2005, 28(5): 637–643. <https://doi.org/10.1093/sleep/28.5.637>
67. Van Baal G. C. M., Boomsma D. I., De Geus E. J. C. Longitudinal genetic analysis of EEG coherence in young twins. *Behavior Genetics*, 2001, 31(6): 637–651. <https://doi.org/10.1023/a:1013357714500>
68. Ríos-López P., Molinaro N., Bourguignon M., Lallier M. Development of neural oscillatory activity in response to speech in children from 4 to 6 years old. *Developmental Science*, 2020, 23(6): 1–16. <https://doi.org/10.1111/desc.12947>
69. Tarokh L., Carskadon M. A., Achermann P. Developmental changes in brain connectivity assessed using the sleep EEG. *Neuroscience*, 2010, 171(2): 622–634. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2010.08.071>
70. Knyazev G. G., Savostyanov A. N., Bocharov A. V., Tamozhnikov S. S., Kozlova E. A., Leto I. V., Slobodskaya H. R. Cross-frequency coupling in developmental perspective. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00158>
71. Knyazev G. G., Savostyanov A. N., Bocharov A. V., Slobodskaya H. R., Bairova N. B., Tamozhnikov S. S., Stepanova V. V. Effortful control and resting state networks: A longitudinal EEG study. *Neuroscience*, 2017, 346: 365–381. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.01.031>
72. Gao C., Scullin M. K. Age-related longitudinal trajectories in NREM and REM spectral power. *Sleep*, 2020, 43(1): A130–A131. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa056.341>
73. Saggar M., Zunesco A. P., King B. G., Bridwell D. A., MacLean K. A., Aichele S. R., Jacobs T. L., Wallace B. A., Saron C. D., Miikkulainen R. Mean-field thalamocortical modeling of longitudinal EEG acquired during intensive meditation training. *NeuroImage*, 2015, 114: 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.03.073>
74. Saggar M., King B. G., Zunesco A. P., MacLean K. A., Aichele S. R., Jacobs T. L., Bridwell D. A., Shaver P. R., Rosenberg E. L., Sahdra B. K., Ferrer E., Tang A. C., Mangun G. R., Wallace B. A., Miikkulainen R., Saron C. D. Intensive training induces longitudinal changes in meditation state-related EEG oscillatory activity. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2012, 6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00256>
75. Skwara A. C., King B. G., Zunesco A. P., Saron C. D. Shifting baselines: Longitudinal reductions in EEG beta band power characterize resting brain activity with intensive meditation. *Mindfulness*, 2022, 13(10): 2488–2506. <https://doi.org/10.1007/s12671-022-01974-9>

76. Gao J., Fan J., Wu B. W. Y., Zhang Z., Chang C., Hung Y.-S., Sik H. H. Entrainment of chaotic activities in brain and heart during MBSR mindfulness training. *Neuroscience Letters*, 2016, 616: 218–223. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2016.01.001>
77. An A., Hoang H., Trang L., Vo Q., Tran L., Le T., Le A., McCormick A., Du Old K., Williams N. S., Mackellar G., Nguyen E., Luong T., Nguyen V., Nguyen K., Ha H. Investigating the effect of mindfulness-based stress reduction on stress level and brain activity of college students. *IBRO Neuroscience Reports*, 2022, 12: 399–410. <https://doi.org/10.1016/j.ibneur.2022.05.004>
78. Zanesco A. P., Skwara A. C., King B. G., Powers C., Wineberg K., Saron C. D. Meditation training modulates brain electric microstates and felt states of awareness. *Human Brain Mapping*, 2021, 42(10): 3228–3252. <https://doi.org/10.1002/hbm.25430>
79. Dziego C. A., Zanesco A. P., Bornkessel-Schlesewsky I., Schlesewsky M., Stanley E. A., Jha A. P. Mindfulness training in high-demand cohorts alters resting-state electroencephalography: An exploratory investigation of individual alpha frequency, aperiodic 1/f activity, and microstates. *Biological Psychiatry Global Open Science*, 2024, 4(6). <https://doi.org/10.1016/j.bpsgos.2024.100383>
80. Moore A., Gruber T., Derose J., Malinowski P. Regular, brief mindfulness meditation practice improves electrophysiological markers of attentional control. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2012, 6. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00018>
81. Nyhus E., Engel W. A., Pitfield T. D., Vakkur I. M. W. Increases in theta oscillatory activity during episodic memory retrieval following mindfulness meditation training. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, 13. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00311>
82. Carpentier S. M., Moreno S., McIntosh A. R. Short-term music training enhances complex, distributed neural communication during music and linguistic tasks. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 2016, 28(10): 1603–1612. [https://doi.org/10.1162/jocn\\_a\\_00988](https://doi.org/10.1162/jocn_a_00988)
83. Khalil A., Musacchia G., Iversen J. R. It takes two: Interpersonal neural synchrony is increased after musical interaction. *Brain Sciences*, 2022, 12(3). <https://doi.org/10.3390/brainsci12030409>
84. Moussiopoulou J., Pross B., Handrack M., Keeser D., Pogarell O., Halle M., Falkai P., Scherr J., Hasan A., Roeh A. The influence of marathon running on resting-state EEG activity: A longitudinal observational study. *European Journal of Applied Physiology*, 2024, 124(4): 1311–1321. <https://doi.org/10.1007/s00421-023-05356-4>
85. Campbell I. G., Cruz-Basilio A., Darchia N., Zhang Z. Y., Feinberg I. Effects of sleep restriction on the sleep electroencephalogram of adolescents. *Sleep*, 2021, 44(6): 1–9. <https://doi.org/10.1093/sleep/zsaa280>
86. Campbell I. G., Grimm K. J., de Bie E., Feinberg I. Sex, puberty, and the timing of sleep EEG-measured adolescent brain maturation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(15): 5740–5743. <https://doi.org/10.1073/pnas.1120860109>
87. Hatzinger M., Brand S., Perren S., Von Wyl A., Stadelmann S., Von Klitzing K., Holsboer-Trachsler E. In pre-school children, sleep objectively assessed via sleep-EEGs remains stable over 12 months and is related to psychological functioning, but not to cortisol secretion. *Journal of Psychiatric Research*, 2013, 47(11): 1809–1814. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychires.2013.08.007>
88. Yousof S., Ibrahim D., El-Baz A., Osama A., El-Wazir Y. Gender difference in the effect of examination stress on brain oscillations during memory tasks. *Suez Canal University Medical Journal*, 2014, 17(1): 21–28. <http://dx.doi.org/10.21608/scumj.2014.45588>
89. Do T. T. N., Wang Y. K., Lin C. T. Increase in brain effective connectivity in multitasking but not in a high-fatigue state. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 2020, 1(1): 566–574. <https://doi.org/10.1109/TCDS.2020.2990898>
90. Harper J., Malone S. M., Iacono W. G. Testing the effects of adolescent alcohol use on adult conflict-related theta dynamics. *Clinical Neurophysiology*, 2017, 128(11): 2358–2368. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.08.019>
91. Brandes-Aitken A., Pini N., Weatherhead M., Brito N. H. Maternal hair cortisol predicts periodic and aperiodic infant frontal EEG activity longitudinally across infancy. *Developmental Psychobiology*, 2023, 65(5): 1–11. <https://doi.org/10.1002/dev.22393>
92. Stamoulis C., Vanderwert R. E., Zeanah C. H., Fox N. A., Nelson C. A. Neuronal networks in the developing brain are adversely modulated by early psychosocial neglect. *Journal of Neurophysiology*, 2017, 118(4): 2275–2288. <https://doi.org/10.1152/jn.00014.2017>
93. Schwartz L., Hayut O., Levy J., Gordon I., Feldman R. Sensitive infant care tunes a frontotemporal interbrain network in adolescence. *Scientific Reports*, 2024, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73630-2>
94. Jones K. T., Johnson E. L., Gazzaley A., Zanto T. P. Structural and functional network mechanisms of rescuing cognitive control in aging. *NeuroImage*, 2022, 262. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119547>

95. Jones K. T., Peterson D. J., Blacker K. J., Berryhill M. E. Frontoparietal neurostimulation modulates working memory training benefits and oscillatory synchronization. *Brain Research*, 2017, 1667: 28–40. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.05.005>
96. Pugin F., Metz A. J., Wolf M., Achermann P., Jenni O. G., Huber R. Local increase of sleep slow wave activity after three weeks of working memory training in children and adolescents. *Sleep*, 2015, 38(4): 607–614. <https://doi.org/10.5665/sleep.4580>
97. Hannesdóttir D. K., Doxie J., Bell M. A., Ollendick T. H., Wolfe C. D. A longitudinal study of emotion regulation and anxiety in middle childhood: Associations with frontal EEG asymmetry in early childhood. *Developmental Psychobiology*, 2010, 52(2): 197–204. <https://doi.org/10.1002/dev.20425>
98. Poole K. L., Santesso D. L., Van Lieshout R. J., Schmidt L. A. Trajectories of frontal brain activity and socio-emotional development in children. *Developmental Psychobiology*, 2018, 60(4): 353–363. <https://doi.org/10.1002/dev.21620>
99. Harrewijn A., Buzzell G. A., Debnath R., Leibenluft E., Pine D. S., Fox N. A. Frontal alpha asymmetry moderates the relations between behavioral inhibition and social-effect ERN. *Biological Psychology*, 2019, 141: 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.biopspsycho.2018.12.014>
100. Hassan R., Schmidt L. A. Longitudinal investigation of shyness and physiological vulnerability: Moderating influences of attention biases to threat and safety. *Developmental Psychobiology*, 2021, 63(7): 1–13. <https://doi.org/10.1002/dev.22180>
101. Goldstein B. L., Shankman S. A., Kujawa A., Torpey-Newman D. C., Dyson M. W., Olino T. M., Klein D. N. Positive and negative emotionality at age 3 predicts change in frontal EEG asymmetry across early childhood. *Journal of Abnormal Child Psychology*, 2019, 47(2): 209–219. <https://doi.org/10.1007/s10802-018-0433-7>
102. McManis M. H., Kagan J., Snidman N. C., Woodward S. A. EEG asymmetry, power, and temperament in children. *Developmental Psychobiology*, 2002, 41(2): 169–177. <https://doi.org/10.1002/dev.10053>
103. He J., Degnan K. A., McDermott J. M., Henderson H. A., Hane A. A., Xu Q., Fox N. A. Anger and approach motivation in infancy: Relations to early childhood inhibitory control and behavior problems. *Infancy*, 2010, 15(3): 246–269. <https://doi.org/10.1111/j.1532-7078.2009.00017.x>
104. Broomell A. P. R., Savla J., Bell M. A. Infant electroencephalogram coherence and toddler inhibition are associated with social responsiveness at age 4. *Infancy*, 2019, 24(1): 43–56. <https://doi.org/10.1111/infa.12273>
105. Poole K. L., Schmidt L. A. Frontal brain delta-beta correlation, salivary cortisol, and social anxiety in children. *The Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 2019, 60(6): 646–654. <https://doi.org/10.1111/jcpp.13016>
106. Myruski S., Bagrodia R., Dennis-Tiwary T. Delta-beta correlation predicts adaptive child emotion regulation concurrently and two years later. *Biological Psychology*, 2022, 167. <https://doi.org/10.1016/j.biopspsycho.2021.108225>
107. Sacks D. D., Schwenn P. E., Boyes A., Mills L., Driver C., Gatt J. M., Lagopoulos J., Hermens D. F. Longitudinal associations between resting-state, interregional theta-beta phase-amplitude coupling, psychological distress, and wellbeing in 12–15-year-old adolescents. *Cerebral Cortex*, 2023, 33(12): 8066–8074. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhad099>
108. Niv S., Ashrafulla S., Tuvblad C., Joshi A., Raine A., Leahy R., Baker L. A. Childhood EEG frontal alpha power as a predictor of adolescent antisocial behavior: A twin heritability study. *Biological Psychology*, 2015, 105: 72–76. <https://doi.org/10.1016/j.biopspsycho.2014.11.010>
109. Tenke C. E., Kayser J., Svob C., Miller L., Alvarenga J. E., Abraham K., Warner V., Wickramaratne P., Weissman M. M., Bruder G. E. Association of posterior EEG alpha with prioritization of religion or spirituality: A replication and extension at 20-year follow-up. *Biological Psychology*, 2017, 124: 79–86. <https://doi.org/10.1016/j.biopspsycho.2017.01.005>
110. Eisenhut L., Sadeghi-Bahmani D., Ngo V. T., Mikoteit T., Brühl A. B., Stadler C., Dürsteler K. M., Hatzinger M., Brand S. The origins of the dark-hyperactivity and negative peer relationships, an objectively lower sleep efficiency, and a longer sleep onset latency at age five were associated with callous-unemotional traits and low empathy at age 14. *Journal of Clinical Medicine*, 2023, 12(6): 1–18. <https://doi.org/10.3390/jcm12062248>
111. Mundy P., Card J., Fox N. EEG correlates of the development of infant joint attention skills. *Developmental Psychobiology*, 2000, 36(4): 325–338. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2302\(200005\)36:4<325::AID-DEV7>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2302(200005)36:4<325::AID-DEV7>3.0.CO;2-F)
112. Mundy P., Fox N., Card J. EEG coherence, joint attention and language development in the second year. *Developmental Science*, 2003, 6(1): 48–54. <https://doi.org/10.1111/1467-7687.00253>
113. Henderson L. M., Yoder P. J., Yale M. E., McDuffie A. Getting the point: Electrophysiological correlates of protodeclarative pointing. *International Journal of Developmental Neuroscience*, 2002, 20(3-5): 449–458. [https://doi.org/10.1016/s0736-5748\(02\)00038-2](https://doi.org/10.1016/s0736-5748(02)00038-2)
114. Brandes-Aitken A., Metser M., Braren S. H., Vogel S. C., Brito N. H. Neurophysiology of sustained attention in early infancy: Investigating longitudinal relations with recognition memory outcomes. *Infant Behavior and Development*, 2023, 70. <https://doi.org/10.1016/j.infbeh.2022.101807>

115. Cuevas K., Bell M. A., Marcovitch S., Calkins S. D. Electroencephalogram and heart rate measures of working memory at 5 and 10 months of age. *Developmental Psychology*, 2012, 48(4): 907–917. <https://doi.org/10.1037/a0026448>
116. Bell M. A., Wolfe C. D. Changes in brain functioning from infancy to early childhood: Evidence from EEG power and coherence working memory tasks. *Developmental Neuropsychology*, 2007, 31(1): 21–38. [https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101\\_2](https://doi.org/10.1207/s15326942dn3101_2)
117. Ríos-López P., Molinaro N., Bourguignon M., Lallier M. Right-hemisphere coherence to speech at pre-reading stages predicts reading performance one year later. *Journal of Cognitive Psychology*, 2021, 34(2): 179–193. <https://doi.org/10.1080/20445911.2021.1986514>
118. Schiavone G., Linkenkaer-Hansen K., Maurits N. M., Plakas A., Maassen B. A. M., Mansvelder H. D., Van der Leij A., Van Zuijen T. L. Preliteracy signatures of poor-reading abilities in resting-state EEG. *Frontiers in human neuroscience*, 2014, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00735>
119. Lyakso E. E., Frolova O. V., Grigorev A. S. Infant vocalizations at the first year of life predict speech development at 2–7 years: Longitudinal study. *Psychology*, 2014, 5(12): 1433–1445. <https://doi.org/10.4236/psych.2014.512154>
120. Bowman L. C., Dodell-Feder D., Saxe R., Sabbagh M. A. Continuity in the neural system supporting children's theory of mind development: Longitudinal links between task-independent EEG and task-dependent fMRI. *Developmental cognitive neuroscience*, 2019, 40. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100705>
121. Finley A. J., Angus D. J., Knight E. L., Van Reekum C. M., Lachman M. E., Davidson R. J., Schaefer S. M. Resting EEG periodic and aperiodic components predict cognitive decline over 10 years. *The Journal of Neuroscience*, 2024, 44(13): 1–12. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1332-23.2024>
122. Brooks H., Mirjalili M., Wang W., Kumar S., Goodman M. S., Zomorodi R., Blumberger D. M., Bowie C. R., Daskalakis Z. J., Fischer C. E., Flint A. J., Herrmann N., Lanctôt K. L., Mah L., Mulsant B. H., Pollock B. G., Voineskos A. N., Rajji T. K. Assessing the longitudinal relationship between theta-gamma coupling and working memory performance in older adults. *Cerebral Cortex*, 2022, 32(8): 1653–1667. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhab295>
123. Zhang L., Gan J. Q., Wang H. Neurocognitive mechanisms of mathematical giftedness: A literature review. *Applied Neuropsychology: Child*, 2017, 6(1): 79–94. <https://doi.org/10.1080/21622965.2015.1119692>
124. Gómez C. M., Barriga-Paulino C. I., Rodríguez-Martínez E. I., Rojas-Benjumea M. Á., Arjona A., Gómez-González J. The neurophysiology of working memory development: From childhood to adolescence and young adulthood. *Reviews in the Neurosciences*, 2018, 29(3): 261–282. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2017-0073>