

Влияние оптической стимуляции с частотами альфа-диапазона ЭЭГ на параметры сенсомоторной деятельности человека

Н.А. Каратыгин¹, И.И. Коробейникова¹, М.А. Цыганова², Я.А. Венерина³, Т.Д. Джебраилова²

¹ Федеральный исследовательский центр оригинальных и перспективных биомедицинских и фармацевтических технологий, Москва, Россия;

² Первый Московский государственный медицинский университет им. И.М. Сеченова (Сеченовский университет), Москва, Россия;

³ Институт психологии Российской академии наук, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование Временные характеристики сенсомоторной деятельности определяются индивидуально-типологическими особенностями человека и могут изменяться под влиянием различных видов экзогенной стимуляции, в том числе оптической. Установлено, что разнонаправленное влияние оптической стимуляции на результативность деятельности связано с характеристиками исходной ЭЭГ индивида. Оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика оказывает наибольшее влияние на эндогенную ритмику, а с частотой выше или ниже на несколько герц способна в некоторых случаях оказывать эффект навязывания ритма и, сдвигая частоту осцилляций нейронных сетей, влиять на результативность деятельности.

Цель. Выявить индивидуальные различия влияния оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика и с частотой, превышающей её на 2 Гц, на параметры сложной сенсомоторной реакции человека.

Методы. В ходе исследования 65 испытуемых (мужчины 18–23 лет, правши) выполняли тесты на простую (в обычных условиях) и сложную двигательные реакции в трёх экспериментальных ситуациях: обычные условия, при предъявлении стимула в условиях оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика, в условиях оптической стимуляции с частотой выше частоты индивидуального α -пика на 2 Гц. Определяли среднее время реакции и её вариабельность. В обычных условиях вычисляли время принятия решения по разнице времени простой и сложной реакций. Выделены две группы испытуемых с малым (1-я группа, 16 человек) и большим (2-я группа, 16 человек) временем принятия решения. По исходной ЭЭГ, зарегистрированной в затылочно-теменных отведениях при закрытых глазах, рассчитывали частоту и амплитуду индивидуального α -пика.

Результаты. Оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика +2 Гц в целом по всем испытуемым снижала время сложной двигательной реакции. У испытуемых с малым временем принятия решения и высокой амплитудой α -пика при оптической стимуляции с частотой α -пика время сложной реакции увеличивалось, при оптической стимуляции с частотой α -пика +2 Гц значимых изменений времени реакции не обнаружено. У испытуемых с большим временем принятия решения и низкой амплитудой α -пика при оптической стимуляции с частотой α -пика значимых изменений времени сложной реакции не наблюдалось, при оптической стимуляции с частотой α -пика +2 Гц уменьшались время и вариабельность сложной реакции.

Заключение. Установлено, что оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика +2 Гц снижает время сложной двигательной реакции у лиц с определёнными электрофизиологическими характеристиками ЭЭГ. Именно поэтому при применении оптической стимуляции с частотами α -диапазона необходимо учитывать исходные характеристики ЭЭГ, прежде всего амплитуду индивидуального α -пика, так как она связана с выраженностью и направленностью эффекта влияния стимуляции. Результаты исследования позволяют говорить о принципиально различном влиянии на временные параметры сенсомоторной деятельности двух исследуемых видов оптической стимуляции с частотами α -диапазона.

Ключевые слова: оптическая стимуляция; индивидуальный альфа-пик; фоновая ЭЭГ; время сенсомоторной реакции.

КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Каратыгин Н.А., Коробейникова И.И., Цыганова М.А., Венерина Я.А., Джебраилова Т.Д. Влияние оптической стимуляции с частотами альфа-диапазона ЭЭГ на параметры сенсомоторной

Рукопись поступила: 15.09.2025

Рукопись одобрена: 22.10.2025

Опубликована online: 27.10.2025

Статья доступна по лицензии CC BY-NC-ND 4.0 International License

© Эко-Вектор, 2025

The Effect of Optical Stimulation With Alpha EEG Frequencies on Human Sensorimotor Activity Parameters

Nikolay A. Karatygin¹, Irina I. Korobeinikova¹, Margarita A. Tsyganova², Yana A. Venerina³, Tamara D. Dzhebrailova²

¹ Federal Research Center for Innovator and Emerging Biomedical and Pharmaceutical Technologies, Moscow, Russia;

² I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Sechenovskiy University), Moscow, Russia;

³ Institute of Psychology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The temporal characteristics of sensorimotor activity are determined by individual typological features of a person and can be altered under the influence of various types of exogenous stimulation, including optical stimulation (OS). It has been established that the multidirectional influence of OS on task performance is associated with the characteristics of an individual's baseline EEG. OS at the frequency of the individual alpha peak has the greatest effect on endogenous rhythmicity. OS at frequencies several Hz higher or lower than the individual alpha peak may, in some cases, induce a rhythm imposition effect and, by shifting the oscillation frequency of neural networks, influence task performance.

AIM: To identify individual differences in the effects of OS at the frequency of the individual alpha peak and at a frequency exceeding it by 2 Hz on the parameters of a complex sensorimotor reaction in humans.

METHODS: 65 subjects (males, 18-23 years old, right-handed) performed tests of simple (under normal conditions) and complex motor reactions in three experimental conditions: (1) normal conditions; (2) during stimulus presentation under OS at the individual alpha peak frequency; (3) under OS at a frequency 2 Hz higher than the individual alpha peak frequency. Mean reaction time and its variability were determined. Under normal conditions, decision time was calculated as the difference between complex and simple reaction times. Two groups of subjects were identified: those with short (Group 1, n=16) and long (Group 2, n=16) decision time. Based on baseline EEG recorded from occipital-parietal leads with eyes closed, the frequency and amplitude of the individual alpha peak were calculated.

RESULTS: Optical stimulation at the individual alpha peak frequency + 2 Hz generally reduced complex motor reaction time across all subjects. In subjects with short decision time and high alpha peak amplitude, OS at the alpha peak frequency increased complex reaction time, while OS at alpha peak + 2 Hz caused no significant changes in reaction time. In subjects with long decision time and low alpha peak amplitude, OS at the alpha peak frequency caused no significant changes in complex reaction time, whereas OS at alpha peak + 2 Hz decreased both the time and variability of the complex reaction.

CONCLUSION: It was established that OS at a frequency of the individual alpha peak + 2 Hz reduces complex motor reaction time in individuals with certain electrophysiological EEG characteristics. Therefore, when applying OS within the alpha frequency range, baseline EEG characteristics, primarily the amplitude of the individual alpha peak, must be taken into account, as it determines the magnitude and directionality of the stimulation effect. The study results indicate a fundamentally different influence of the two investigated types of alpha-range OS on the temporal parameters of sensorimotor activity.

Keywords: optical stimulation; individual alpha peak; background EEG; sensorimotor reaction time.

TO CITE THIS ARTICLE:

Karatygin NA, Korobeinikova II, Tsyganova MA, Venerina YaA, Dzhebrailova TD. The Effect of Optical Stimulation With Alpha EEG Frequencies on Human Sensorimotor Activity Parameters. *Ekologiya*

Received: 15.09.2025

Accepted: 22.10.2025

Published online: 27.10.2025

The article can be used under the CC BY-NC-ND 4.0 International License

© Eco-Vector, 2025

ОБОСНОВАНИЕ

В современном мире человек постоянно подвергается воздействию множества экзогенных факторов, многие из которых обладают ритмическим характером, например, акустические или электромагнитные шумы различных частот. Эти факторы могут оказывать значительное влияние на функциональное состояние организма человека и эффективность различных видов деятельности [1, 2]. Направленность эффекта зависит как от характеристик самого фактора, так и от индивидуальных нейрофизиологических особенностей человека. В условиях ритмической стимуляции люди с разной организацией высшей нервной деятельности способны демонстрировать снижение или повышение результативности, например, сенсомоторной деятельности (СМД), что особенно актуально в производственной, транспортной и спортивной сферах.

Параметры сенсомоторных реакций (СМР) являются важными индивидуально-типологическими характеристиками человека, отражающими способность быстро и точно обрабатывать информацию и реагировать на внешние стимулы. Простые СМР включают реакцию на одиночный стимул, что позволяет оценить быстроту и стабильность сенсомоторного реагирования. Сложные СМР, такие как реакции выбора или дифференцировочные реакции (реакции Go/No-go), предполагают более высокий уровень когнитивной обработки поскольку требуют выбора реакции в зависимости от типа стимула или её торможения на нерелевантный стимул.

Стандартными показателями СМР являются время реакции (временной интервал от подачи стимула до моторного ответа), показатель вариабельности сенсомоторного реагирования (индивидуальная изменчивость времени реакции, чаще всего определяемая по величине стандартного отклонения) и количество опережающих реакций и ошибок.

Время реакции может быть связано с различными личностными характеристиками индивида, такими как общий уровень активации нервной системы [3], уровень внимания, личностная и ситуативная тревожность [4, 5].

Показатель вариабельности СМР, наряду с временем реакции, является одной из главных характеристик СМД. Показано, что высокая вариабельность связана с более низкой результативностью выполнения сложных когнитивных задач [6]. Полагают, что она косвенно характеризует устойчивость внимания испытуемого [7]. Высокая вариабельность простой двигательной реакции может являться коррелятом ряда психических и соматических расстройств, например, наблюдается при аутизме, синдроме дефицита внимания и гиперактивности [8].

При анализе СМР обычно выделяют премоторный и моторный компоненты. Премоторный компонент отражает преимущественно процессы, связанные с восприятием и анализом стимула, а моторный связывают с реализацией двигательного ответа.

Для дифференцировочных реакций премоторный компонент включает не только детекцию стимула, как в простых СМР, но и дополнительный анализ этого стимула для принятия решения о необходимости действия или игнорирования стимула. Время принятия решения (ВПР) можно рассчитать как разницу между временем простой и дифференцировочной СМР. Результаты собственных исследований и данные литературы свидетельствуют о том, что ВПР имеет существенные индивидуальные различия, которые коррелируют с некоторыми особенностями исходной ЭЭГ человека [9].

Временные характеристики СМР определяются не только индивидуально-типологическими особенностями, но и могут изменяться под влиянием различных видов экзогенной стимуляции. Показано, что в этом случае применимы не только методы электрической и магнитной транскраниальной стимуляции [10], непосредственно влияющие на частотные характеристики нейронной активности, но и более простые и доступные методы звуковой [11] или оптической [12] стимуляции, которые при правильно подобранном частотном воздействии также могут изменять эндогенную активность нейронных ансамблей, что в свою очередь влияет на показатели СМР. В

ряде исследований показано, что оптическая стимуляция на частотах α -диапазона (8–12 Гц) может оказывать разнонаправленные влияния на результативность как сенсомоторной, так и когнитивной деятельности. Это зависит от специфики самой деятельности и от психофизиологических характеристик индивида. С одной стороны, установлено, что такая оптическая стимуляция приводит к повышению пропускной способности и надёжности человека-оператора (уменьшению количества ошибок) [13]. С другой стороны, показано, что для некоторых видов деятельности, связанных, например, со временем распознавания зрительных стимулов, оптическая стимуляция и последующие эффекты навязывания ритма в структурах зрительной системы могут иметь негативное влияние на успешность выполнения задания [14].

По данным литературы, премоторный компонент сложной реакции, главной составляющей которого является ВПР, более подвержен влиянию различных эндогенных и экзогенных факторов, таких как эмоциональное состояние индивида [15], степень утомления [16], сложность сенсомоторного задания [17], различные фармакологические воздействия [18], поэтому можно полагать, что именно ВПР будет наиболее чувствительно и к воздействию оптической стимуляции. Можно также предположить, что характер (направленность) влияния оптической стимуляции на параметры СМД связан с индивидуальными различиями ВПР. Именно поэтому для выявления индивидуальных особенностей, обуславливающих различный эффект оптической стимуляции на параметры СМД, мы выделили группы испытуемых с малым и большим ВПР в обычных условиях без оптической стимуляции.

Ранее в наших исследованиях установлено, что разнонаправленное влияние оптической стимуляции на результативность мнестической деятельности связано с индивидуальными характеристиками фоновой ЭЭГ человека. Было показано, что у лиц с изначально более низкой спектральной мощностью поддиапазона 10 Гц увеличение эффективности мнестической деятельности (тест *n-back*) в условиях оптической стимуляции сопровождалось увеличением спектральной мощности этого поддиапазона [19].

Наряду с традиционно используемыми спектральными показателями исходной ЭЭГ, в настоящее время предметом анализа α -активности часто являются характеристики индивидуального α -пика: его частота (IAF — Individual Alpha Frequency) и амплитуда. В ряде исследований показано, что IAF может отражать различия индивидов по эффективности рабочей памяти, скорости переработки информации, времени реакции и может изменяться при выполнении когнитивных задач или физических упражнений [20, 21].

Связь частоты α -ритма и эффектов оптической стимуляции может быть рассмотрена в двух аспектах. С одной стороны, нами показано, что под влиянием оптической стимуляции с частотой 10 Гц изменяется вариабельность простой СМР человека, причём направленность таких изменений зависит от базовых характеристик фоновой ЭЭГ — глубины десинхронизации высокочастотного диапазона α -ритма и IAF исходной ЭЭГ [22]. С другой стороны, в исследованиях установлено, что оптическая стимуляция с индивидуальной частотой α -пика оказывает наибольшее влияние на эндогенную ритмику, а с частотой выше или ниже на несколько герц способна в некоторых случаях оказывать эффект навязывания ритма и, сдвигая частоту работы нейронных ансамблей, влиять на результативность деятельности [23]. С учётом того, что выраженность навязывания ритма зависит от силы стимуляции и разницы между IAF и частотой стимуляции [24], во многих исследованиях авторы выбирают частоту стимуляции IAF ± 1 Гц или IAF ± 2 Гц. При этом IAF ± 2 Гц рассматривается в качестве наиболее подходящего компромиссного значения, дающего достаточный эффект оптической стимуляции без необходимости использования чрезмерно яркого источника света.

Цель исследования. Выявить индивидуальные различия влияния оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика и с частотой, превышающей её на 2 Гц, на параметры сложной СМР человека.

МЕТОДЫ

В исследовании на основе добровольного информированного согласия участвовали 65 мужчин 18–23 лет, правши, с нормальной остротой зрения или скорректированной до нормальной. Исследования одобрены этическим комитетом Первого Московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова (протокол № 10-24 от 18.04.2024) и были проведены в апреле-июне 2024 года.

Испытуемый находился в затемнённой комнате в отсутствии посторонних раздражителей, сидя на расстоянии 70 см от экрана монитора. В качестве СМД предлагали два компьютеризированных теста на время простой двигательной реакции (ВПДР; 70 предъявлений стимулов) и на время сложной

двигательной реакции (ВСПР, Go/No-go; 70 предъявлений целевого стимула и 70 предъявлений нерелевантного стимула). В первом случае задача испытуемого заключалась в том, чтобы как можно скорее нажать на определённую кнопку клавиатуры правой рукой при появлении красного круга в центре экрана монитора, стараясь не допускать преждевременных нажатий. Интервал между сигналами составлял от 0,8 до 2,5 с. При выполнении теста на ВСПР испытуемый должен был реагировать нажатием кнопки только на стимул красного цвета, игнорируя стимул зелёного цвета. В обследовании использовали монитор HP 2011x с диагональю 20 дюймов. Для оптической стимуляции применяли фотостимулятор 7,5×7,5 см, который располагался непосредственно над монитором. При мерцании стимулятора яркость вспышек, измеренная в непосредственной близости от него, составляла 200 lx.

Сенсомоторный тест на ВПДР оценивали в обычных условиях (ситуация ТЕСТ). ВСПР предъявляли в трёх экспериментальных ситуациях: в обычных условиях (ТЕСТ); при предъявлении стимула в условиях оптической стимуляции с частотой IAF испытуемого (ТЕСТiaf); в условиях оптической стимуляции с частотой выше IAF на 2 Гц (ТЕСТiaf+2). Общее время оптической стимуляции было индивидуально, зависело от скорости реакции испытуемого и примерно составляло 5,12 мин с частотой IAF и 5,12 мин с частотой IAF+2.

При обработке результатов тестов определяли среднее ВПДР и ВСПР в мс, а также вариабельность ВСПР ($SD_{вспр}$) как стандартное отклонение в трёх экспериментальных ситуациях. Для каждого испытуемого высчитывали ВПР (мс) по разнице значений ВСПР и ВПДР в обычных условиях (ситуация ТЕСТ).

Регистрацию ЭЭГ (17 отведений, монополярно по схеме 10–10: F3, Fz, F4, T3, C3, Cz, C4, T4, P3, Pz, P4, O1, Oz, O2, P5, Poz, P6) проводили на электроэнцефалографе NVX-52 (Россия, ООО «Медицинские компьютерные системы», Зеленоград). По данным ЭЭГ, зарегистрированной в исходном состоянии при закрытых глазах в девяти затылочно-теменных отведениях (P3, Pz, P4, O1, Oz, O2, P5, Poz, P6), рассчитывали IAF и амплитуду α -пика путём вычисления значения спектральной плотности мощности ЭЭГ α -диапазона (8–13 Гц) с использованием метода multi-taper, реализованного посредством функции `psd_multitaper` модуля MNE-python [25].

Проверку данных на нормальность распределения проводили по тесту Колмогорова–Смирнова. Для представления и анализа результатов использовали методы непараметрической статистики («STATISTICA v.8»). Данные представлены в виде медианы (Me) и интерквартильного размаха [Q1; Q3]. При сравнении результатов обследования испытуемых независимых групп использовали U -критерий Манна–Уитни. Изменения показателей в разных ситуациях у испытуемых одной группы оценивали с применением T -критерия Вилкоксона. Достоверными считали отличия при $p < 0,05$. Значения p скорректированы с учётом поправки по Бонферрони.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведённый анализ по группе испытуемых в целом выявил ряд различий в значениях ВСПР в трёх экспериментальных ситуациях. Установлено уменьшение ВСПР в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуациями ТЕСТ и ТЕСТiaf. Различия по показателю вариабельности ВСПР в группе испытуемых в целом в трёх экспериментальных ситуациях не зарегистрированы (табл. 1).

Обращали на себя внимание существенные индивидуальные различия изменения ВСПР в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с другими ситуациями. По сравнению с ситуацией ТЕСТ уменьшение ВСПР составило 5,95 [–2,90; 13,95] мс при индивидуальных вариациях от уменьшения на 30,05 мс до увеличения на 35,85 мс.

ВПР, составившее в целом по группе 78,05 [65,90; 89,65] мс, индивидуально варьировало от минимальных 43,3 мс до максимальных 168,8 мс. В соответствии с Q1 и Q3 были выделены две группы испытуемых: с малым (1-я группа, 16 человек,) и большим (2-я группа, 16 человек) ВПР. У испытуемых 1-й группы ВПР составило 55,3 [49,13; 61,10] мс, 2-й группы — 105,0 [95,83; 126,60] мс.

Параметры простой и сложной СМД в трёх ситуациях обследования у испытуемых двух групп представлены в табл. 2.

ВПДР у испытуемых выделенных групп значимо не различалось. ВСПР во всех ситуациях было значимо большим у испытуемых 2-й группы. Направленность изменений ВСПР в условиях оптической стимуляции у испытуемых выделенных групп была различной.

У испытуемых 1-й группы ВСПР в условиях ТЕСТiaf было большим, чем в обычных условиях. В ситуации ТЕСТiaf+2 ВСПР не отличалось от наблюдавшегося в обычных условиях.

У испытуемых 2-й группы в условиях ТЕСТiaf относительно ситуации ТЕСТ значимых изменений ВСДР не обнаружено. В условиях ТЕСТiaf+2 ВСДР было меньше, чем в ситуации ТЕСТ.

SDвсдр в ситуации ТЕСТ у испытуемых 1-й группы по сравнению с испытуемыми 2-й группы было достоверно ниже (см. табл. 2). Значимых изменений этого показателя у испытуемых 1-й группы при выполнении ВСДР в условиях ТЕСТiaf и ТЕСТiaf+2 не зарегистрировано. У испытуемых 2-й группы в условиях ТЕСТiaf+2 имелось снижение вариабельности ВСДР по сравнению с ситуацией ТЕСТ на уровне тенденции.

Таким образом, у лиц с малым ВПР в условиях ТЕСТiaf ВСДР увеличивалось, при этом его вариабельность не изменялась. У лиц с исходно большим ВПР в ситуации ТЕСТiaf+2 ВСДР уменьшалась.

По частоте IAF испытуемые выделенных групп не различались: 10,13 [9,80; 10,63] Гц и 10,30 [9,74; 11,26] Гц соответственно группам. Амплитуда α -пика была достоверно выше у испытуемых 1-й группы: 65,64 [14,35; 171,45] мкВ и 14,22 [6,93; 46,87] мкВ соответственно группам, $U=73,0$; $Z=2,073$; $p=0,038$.

ОБСУЖДЕНИЕ

В литературе при анализе характеристик α -пика основное внимание уделяется его частоте, при этом существенно меньшее количество исследований посвящено анализу амплитуды α -пика. Однако амплитуда и частота α -пика по-разному коррелируют с поведенческими показателями [26].

Анализ фоновой ЭЭГ испытуемых установил, что амплитуда α -пика была значимо выше у лиц с исходно малым ВПР. По частоте α -пика испытуемые выделенных групп не различались. Несмотря на то что существуют работы, свидетельствующие о взаимосвязи IAF и некоторых скоростных характеристик обработки зрительной информации [27], также имеются свидетельства, что непосредственно скорость СМР не зависит от IAF [28].

В настоящем исследовании применяли два вида оптической стимуляции. По данным литературы, стимуляция с частотой индивидуального α -пика и с частотой, отличающейся от неё на несколько герц, оказывает разное влияние на характеристики α -активности, а также на результативность деятельности [29].

Также известно, что оптическая стимуляция с частотой IAF даёт наибольший прирост амплитуды α -ритма по сравнению с оптической стимуляцией, отличающейся от IAF, увеличивая синхронизацию активности ансамблей нейронов, осциллирующих на этой частоте, что может как позитивно, так и негативно влиять на результат СМД [23].

Проведённое исследование показало, что у испытуемых с исходно малым ВПР и высокой исходной амплитудой α -пика при оптической стимуляции с частотой IAF наблюдалось увеличение ВСДР. В группе испытуемых с большим ВПР и низкой амплитудой α -пика в этих условиях не только не наблюдалось увеличения ВСДР, но отмечалось некоторое уменьшение времени реакции, не достигавшее, однако, статистически значимого уровня. Эти факты можно объяснить с учётом известной концепции о том, что наибольшей эффективности деятельности соответствует некоторый средний или оптимальный уровень активации (кривая Йеркса–Додсона) [30]. Мощность α -ритма является одним из параметров, отражающих уровень активации коры головного мозга, который обусловлен влиянием комплекса факторов, таких как специфические и неспецифические активирующие влияния, мотивация, эмоциональное состояние, тревожность и другие. Можно полагать, что у испытуемых с малым ВПР и относительно высокой исходной амплитудой α -пика такой оптимальный для СМД уровень активации наблюдался именно при тестировании в обычных условиях. А усиление синхронизации α -ритма при оптической стимуляции соответствующей частоты приводило к «выходу» из оптимальной зоны и увеличению времени сложной реакции. В то же время у части испытуемых с исходно низкой амплитудой α -пика и большим временем реакции оптическая стимуляция с частотой IAF, способствующая синхронизации α -ритма, сопровождалась уменьшением ВСДР, что и проявлялось в уменьшении медианы, не достигавшем, однако статистически значимого уровня. Можно полагать, что одним из факторов, определяющих характер влияния оптической стимуляции с частотой IAF на параметры СМД конкретного индивида, является соотношение наблюдаемого во время тестирования и оптимального для деятельности уровня активации коры головного мозга.

Оптическая стимуляция с частотой, отличающейся от IAF на несколько герц, работает по другому принципу, такая стимуляция может оказывать эффект навязывания ритма и сдвигать частоту осцилляции нейронных сетей. В литературе эффективность такого сдвига объясняется с помощью концепции «язык Арнольда», которая описывает динамические принципы взаимодействия

экзогенных ритмов и мозговых осцилляций. Чем ближе частота стимуляции к собственной частоте мозгового ритма и чем выше интенсивность стимуляции, тем сильнее эффект навязывания ритма. Таким образом, для α -ритма эффективность сдвига эндогенных осцилляций прежде всего будет зависеть от силы стимуляции и разницы между IAF и частотой стимуляции [24]. Было показано, что успешное навязывание ($IAF \pm 2$ Гц), осуществлённое с помощью метода транскраниальной электрической стимуляции, может оказывать влияние и на результативность выполнения перцептивной и СМД [31]. Оптическая стимуляция с частотой, превышающей IAF, также способна вызывать эффект навязывания ритма и оказывать положительное влияние на временные характеристики СМД [23].

Результат настоящего исследования в целом согласуется с данными литературы и подтверждает возможность увеличения скорости сложной СМР путём применения оптической стимуляции с частотой IAF +2 Гц. Однако в нашем исследовании установлено, что уменьшение времени реакции в ситуации оптической стимуляции с частотой IAF +2Гц по сравнению с обычными условиями наблюдалось у испытуемых с исходно большим ВПР и низкой амплитудой α -пика. В той же ситуации у испытуемых с малым ВПР и относительно высокой амплитудой α -пика изменений времени сложной СМР не выявлено.

В литературе приводятся данные о том, что чем шире α -кривая в состоянии покоя (и, вероятно, ниже амплитуда α -пика), тем выше эффекты модуляции, направленные на смещение собственной частоты в сторону быстрых ритмов [29]. Можно полагать, что оптическая стимуляция с частотой IAF +2Гц в большей мере увеличивает частоту α -ритма при навязывании у испытуемых с низкой амплитудой α -пика. С другой стороны, известны количественные закономерности обработки информации человеком, рассчитанные на основе интегральной модели деятельности мозга, одним из основных нейрофизиологических параметров которой является частота доминирующего α -ритма [32]. Согласно этим представлениям, у лиц с исходно низкой амплитудой α -пика (и исходно высоким ВПР) уменьшение времени сложной реакции, по-видимому, происходит за счёт более выраженного эффекта навязывания ритма, когда оптическая стимуляция с частотой IAF +2Гц увеличивает частоту активности нейронных ансамблей, что способствует уменьшению ВСДР и его вариабельности. В отличие от них, у испытуемых с высокой исходной амплитудой α -пика и низким ВПР подобная стимуляция не оказывала выраженного эффекта на время реакции относительно выполнения теста без оптической стимуляции.

Таким образом, настоящее исследование показало, что оптическая стимуляция с частотой, превышающей IAF на 2 Гц, способна уменьшать время сложной реакции у испытуемых с определёнными электрофизиологическими характеристиками исходной ЭЭГ, в то время как оптическая стимуляция с частотой IAF не оказывала выраженного положительного эффекта на скоростные характеристики СМД, а у части испытуемых могла приводить к снижению результата. В целом можно сделать вывод, что при применении оптической стимуляции с частотами α -диапазона необходимо учитывать индивидуальные характеристики исходной ЭЭГ человека. Исходя из полученных результатов, наиболее эффективно использование оптической стимуляции с частотой IAF +2Гц у лиц с исходно большим ВПР, которые характеризуются низкой амплитудой индивидуального α -пика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем исследовании применяли два вида оптической стимуляции — с частотой индивидуального α -пика ЭЭГ и с частотой выше индивидуального α -пика на 2 Гц. Установлено, что оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика +2 Гц снижает время сложной двигательной реакции у части испытуемых с определёнными электрофизиологическими характеристиками ЭЭГ. У лиц с разным исходным ВПР изменения временных параметров сложной двигательной реакции в условиях оптической стимуляции с указанными частотами α -диапазона различны. При этом у лиц с исходно низким ВПР амплитуда α -пика была значимо выше, чем у испытуемых с большим ВПР. Показано, что оптическая стимуляция с частотой индивидуального α -пика может оказывать негативный эффект на результативность СМД лиц с исходно низким ВПР. У испытуемых с исходно высоким ВПР в ситуации оптической стимуляции с частотой выше индивидуального α -пика на 2 Гц снижалось время сложной двигательной реакции по сравнению со временем реакции в условиях отсутствия стимуляции. По частоте α -пика испытуемые выделенных групп не различались. Таким образом, установлено, что ВПР связано с исходными характеристиками ЭЭГ, в первую очередь с амплитудой индивидуального α -пика, что может служить объяснением разнонаправленности эффектов влияния оптической стимуляции с частотами α -диапазона на

временные параметры СМР человека. При этом результаты исследования позволяют говорить о принципиально различном влиянии на временные параметры СМД двух исследуемых видов оптической стимуляции α -диапазона. Проведённое исследование может иметь важное значение для оценки экологичности ритмической световой стимуляции α -диапазона в современной техногенной среде и понять её потенциальное влияние на сенсомоторные функции человека, что полезно при разработке безопасных и эффективных подходов к использованию такого воздействия в повседневной жизни и профессиональной деятельности.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Н.А. Каратыгин, И.И. Коробейникова — сбор и анализ литературных источников, биоинформатический анализ данных, подготовка и написание текста статьи; М.А. Цыганова, Я.А. Венерина — проведение обследований, обработка данных; Т.Д. Джебрайлова — написание текста и редактирование статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Этическая экспертиза. Проведение исследования одобрено локальным этическим комитетом Первого Московского государственного медицинского университета им. И.М. Сеченова (протокол № 10-24 от 18.04.2024).

Согласие на публикацию. Все участники исследования добровольно подписали форму информированного согласия до включения в исследование.

Источники финансирования. Исследование проведено в рамках Государственного задания.

Раскрытие интересов. Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные).

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: N.A. Karatygin, I.I. Korobeinikova: collection and analysis of literary sources, bioinformatics data analysis, preparation and writing of the text of the article; M.A. Tsyganova, Ya.A. Venerina: experimental procedures, data processing; T.D. Dzhebrailova: writing of the text and editing the article. All authors approved the manuscript (the version for publication), and also agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring proper consideration and resolution of questions related to the accuracy and integrity of any part of it.

Ethics approval: The study was approved by the Local Ethics Committee of the I.M. Sechenov First Moscow State Medical University (Protocol No. 10-24 dated 04/18/2024).

Consent for publication: All participants provided written informed consent prior to inclusion in the study.

Funding sources: This work was supported by the State Task.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: No previously published material (text, images, or data) was used in this work.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work, as no new data was collected or created.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Provenance and peer review: This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review process involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Meinert EK, Solovyev AV. The effect of tonal acoustic noise with a frequency of 100 Hz on simple human sensorimotor reactions. In: *Actual problems of radiophysics APR-2021: Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference*. Tomsk; 2021. P. 257–259. (In Russ.) EDN: AEWWCL
2. Rakhimbekov MS. The impact of electromagnetic radiation on human. *Occupational Hygiene and Medical Ecology*. 2017;(3):3–11.
3. Bagherli J, Vaez M, Mokhtari P. Effects of arousal and activation on simple and discriminative reaction time in a stimulated arousal state. *World Applied Sciences Journal*. 2011;12(10):1877–1882. EDN: YBLTLZ
4. Taleeva AI, Madumarova IT, Zvyagina NV. The success of cognitive activity of students of the northern (arctic) federal university with different levels of anxiety in different time conditions. *Journal of Ural Medical Academic Science*. 2021;18(1):52–59. doi: 10.22138/2500-0918-2021-18-1-52-59 EDN: GQLLHY
5. Vishnevskaya NL, Plakhova LV, Liskova MYu. Problems of improving working capacity of the operators at high-tech industries. *Occupational Safety in Industry*. 2021;(8):39–44. doi: 10.24000/0409-2961-2021-8-39-44 EDN: BSZGPT
6. Papenberg G, Hämmerer D, Müller V, et al. Lower theta inter-trial phase coherence during performance monitoring is related to higher reaction time variability: a lifespan study. *Neuroimage*. 2013;83:912–920. doi: 10.1016/j.neuroimage.2013.07.032
7. Zaitsev AV, Lupandin VI, Surnina OE. Reaction time in theoretical and applied research. *Psychological Bulletin of the Ural State University*. 2002;(3):3–20. (In Russ.) EDN: JSPZCL
8. Rommelse NN, Geurts HM, Franke B, et al. A review on cognitive and brain endophenotypes that may be common in autism spectrum disorder and attention-deficit/hyperactivity disorder and facilitate the search for pleiotropic genes. *Neurosci Biobehav Rev*. 2011;35(6):1363–1396. doi: 10.1016/j.neubiorev.2011.02.015
9. Korobeynikova II. The correlation of reaction times properties with psychophysiological characteristics, academic achievement and EEG indices in humans. *Psikhologicheskii Zhurnal*. 2000;21(3):132–136. EDN: TBVNPF
10. Terao Y, Ugawa Y, Suzuki M, et al. Shortening of simple reaction time by peripheral electrical and submotor-threshold magnetic cortical stimulation. *Exp Brain Res*. 1997;115(3):541–545. doi: 10.1007/pl00005724
11. Henao D, Navarrete M, Valderrama M, Le Van Quyen M. Entrainment and synchronization of brain oscillations to auditory stimulations. *Neurosci Res*. 2020;156:271–278. doi: 10.1016/j.neures.2020.03.004
12. Wearden JH, Williams EA, Jones LA. What speeds up the internal clock? Effects of clicks and flicker on duration judgements and reaction time. *Q J Exp Psychol*. 2017;70(3):488–503. doi: 10.1080/17470218.2015.1135971
13. Akhrarov NM, Baranova YuA, Vasileva MV, Romanovsky MN. Rhythmic stimulation of human operator throughput. *Fundamental Problems of Electronic Instrumentation*. 2015;15(5):60–63. (In Russ.) EDN: VOUEFP
14. Gulbinaite R, van Viegen T, Wieling M, et al. individual alpha peak frequency predicts 10 Hz flicker effects on selective attention. *J Neurosci*. 2017;37(42):10173–10184. doi: 10.1523/JNEUROSCI.1163-17.2017
15. Klimovitch G. Startle response and muscular fatigue effects upon fractionated hand grip reaction time. *J Mot Behav*. 1977;9(4):285–292. doi: 10.1080/00222895.1977.10735120
16. Hanson C, Lofthus GK. Effects of fatigue and laterality on fractionated reaction time. *J Mot Behav*. 1978;10(3):177–184. doi: 10.1080/00222895.1978.10735151
17. Oude Lohuis MN, Pie JL, Marchesi P, et al. Task complexity temporally extends the causal requirement for visual cortex in perception. *bioRxiv*. Preprint: June 22, 2021. doi: 10.1101/2021.06.22.449366
18. Neznamov GG, Teleshova ES, Synyakov SA, et al. The effect of Ladasten on the characteristics of the psychophysiological state and cognitive functions in patients with psychogenic asthenic disorders. *Psychiatry and Psychopharmacotherapy*. 2009;11(2):14–19. (In Russ.) EDN: NDGFVL
19. Korobeinikova II, Karatygin NA, Pertsov SS. Analysis of endogenous spectral power of electroencephalogram alpha range biopotentials during the mnemonic activity under conditions of

- rhythmically organized optical stimulation. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2021;171(6):676–680. doi: 10.47056/0365-9615-2021-171-6-676-680
20. Samuel IBH, Wang C, Hu Z, Ding M. The frequency of alpha oscillations: Task-dependent modulation and its functional significance. *Neuroimage*. 2018;183:897–906. doi: 10.1016/j.neuroimage.2018.08.063
 21. Balioz NV, Arkhipova EE, Mozolevskaya NV, Krivoshchekov SG. Electroencephalographic markers of CNS functional state in sport. *Ulyanovsk Medico-biological Journal*. 2023;(3):30–48. doi: 10.34014/2227-1848-2023-3-30-48 EDN: KOTLOG
 22. Karatygin NA, Korobeinikova II, Venerina YaA, et al. Influence of rhythmic optical stimulation on temporal parameters of human sensorimotor response and their relation to the spectral characteristics of the initial EEG. *Bulletin of Experimental Biology and Medicine*. 2024;178(8):136–140. doi: 10.47056/0365-9615-2024-178-8-136-140 EDN: CRDNJT
 23. Ronconi L, Busch NA, Melcher D. Alpha-band sensory entrainment alters the duration of temporal windows in visual perception. *Sci Rep*. 2018;8(1):11810. doi: 10.1038/s41598-018-29671-5
 24. Notbohm A, Kurths J, Herrmann CS. Modification of brain oscillations via rhythmic light stimulation provides evidence for entrainment but not for superposition of event-related responses. *Front Hum Neurosci*. 2016;10:10. doi: 10.3389/fnhum.2016.00010
 25. Gramfort A, Luessi M, Larson E, et al. MEG and EEG data analysis with MNE-Python. *Front Neurosci*. 2013;7:267. doi: 10.3389/fnins.2013.00267
 26. Katyal S, He S, He B, Engel SA. Frequency of alpha oscillation predicts individual differences in perceptual stability during binocular rivalry. *Hum Brain Mapp*. 2019;40(8):2422–2433. doi: 10.1002/hbm.24533
 27. Samaha J, Postle BR. The speed of alpha-band oscillations predicts the temporal resolution of visual perception. *Curr Biol*. 2015;25(22):2985–2990. doi: 10.1016/j.cub.2015.10.007
 28. Hülzdünker T, Mierau A. Visual perception and visuomotor reaction speed are independent of the individual alpha frequency. *Front Neurosci*. 2021;15:620266. doi: 10.3389/fnins.2021.620266
 29. Trajkovic J, Sack AT, Romei V. EEG-based biomarkers predict individual differences in TMS-induced entrainment of intrinsic brain rhythms. *Brain Stimul*. 2024;17(2):224–232. doi: 10.1016/j.brs.2024.02.016
 30. Heckhausen H. *Motivation and Activity*. Saint Petersburg: Piter; 2003. 860 p. (In Russ.) ISBN: 5-94723-389-4
 31. Zhang Y, Zhang Y, Cai P, et al. The causal role of α -oscillations in feature binding. *Proc Nat Acad Sci*. 2019;116(34):17023–17028. doi: 10.1073/pnas.1904160116
 32. Lebedev AN, Konstanta M.N. Livanov's constant and psychophysiological regularities of brain functioning (to 100-th anniversary). *Psikhologicheskii Zhurnal*. 2008;29(1):133–137. EDN: INMIWB

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

* Автор, ответственный за переписку	* Corresponding author
* Коробейникова Ирина Ивановна , канд. биол. наук; адрес: Россия, 125315, Москва, Балтийская, д. 8; ORCID: 0000-0001-7570-6321; eLibrary SPIN: 2829-9765; e-mail: korobejnikova_ii@academpharm.ru	* Irina I. Korobeinikova , Cand. Sci. (Biology); address: 8 Baltiyskaya st, Moscow, Russia, 125315; ORCID: 0000-0001-7570-6321; eLibrary SPIN: 2829-9765; e-mail: korobejnikova_ii@academpharm.ru
Каратыгин Николай Алексеевич , канд. биол. наук; ORCID: 0000-0001-5523-4048; eLibrary SPIN: 7360-2272; e-mail: karatygin_na@academpharm.ru	Nikolay A. Karatygin , Cand. Sci. (Biology); ORCID: 0000-0001-5523-4048; eLibrary SPIN: 7360-2272; e-mail: karatygin_na@academpharm.ru
Цыганова Маргарита Андреевна ; ORCID: 0000-0002-7641-2330; eLibrary SPIN: 7968-0651; e-mail: oplatchikova_m_a@staff.sechenov.ru	Margarita A. Tsyganova ; ORCID: 0000-0002-7641-2330; eLibrary SPIN: 7968-0651; e-mail: oplatchikova_m_a@staff.sechenov.ru
Венерина Яна Андреевна , канд. мед. наук; ORCID: 0000-0002-3460-078X;	Yana A. Venerina , MD, Cand. Sci. (Medicine); ORCID: 0000-0002-3460-078X;

eLibrary SPIN: 6689-8898; e-mail: y.a.venerina@yandex.ru	eLibrary SPIN: 6689-8898; e-mail: y.a.venerina@yandex.ru
Джебраилова Тамара Джебраиловна, д-р биол. наук, профессор; ORCID: 0000-0003-1454-9224; eLibrary SPIN: 6942-3352; e-mail: dzhebrailova@mail.ru	Tamara D. Dzhebrailova , Dr. Sci. (Biology), Professor; ORCID: 0000-0003-1454-9224; eLibrary SPIN: 6942-3352; e-mail: dzhebrailova@mail.ru

ТАБЛИЦЫ

Таблица 1. Значения времени сложной двигательной реакции и его вариабельности в ситуациях ТЕСТ, ТЕСТiaf, ТЕСТiaf+2, Me [Q1; Q3]**Table 1.** Values of CMRT (complex motor reaction time) and its variability in TEST, TESTiaf, and TESTiaf+2 conditions, Me [Q1; Q3]

Показатели	ТЕСТ	ТЕСТiaf	ТЕСТiaf+2
Время сложной двигательной реакции, мс	362,85* [344,70; 387,15]	363,10* [345,60; 382,80]	359,90* [339,30; 382,05]
SDвсдр, мс	53,04 [46,06; 61,50]	52,34 [42,79; 59,62]	49,58 [42,54; 66,63]

Примечание. ТЕСТ — обычные условия; ТЕСТiaf — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика испытуемого; ТЕСТiaf+2 — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой выше индивидуального α -пика испытуемого на 2 Гц; SDвсдр — вариабельность времени сложной двигательной реакции; * достоверные отличия значений времени сложной двигательной реакции в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуацией ТЕСТ ($T=666$; $Z=2,66$; $p=0,0079$); # достоверные отличия значений времени сложной двигательной реакции в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуацией ТЕСТiaf ($T=565$; $Z=3,18$; $p=0,0015$).

Таблица 2. Показатели времени простой и сложной двигательных реакций в ситуациях ТЕСТ, ТЕСТiaf, ТЕСТiaf+2 испытуемых 1-й и 2-й групп, Me [Q1; Q3]**Table 2.** Parameters of simple (SMRT) and complex (CMRT) motor reaction times in TEST, TESTiaf, and TESTiaf+2 conditions for Group 1 and Group 2 subjects, Me [Q1; Q3]

Показатели	1-я группа	2-я группа	Тест Манна-Уитни U ; Z ; p
ВПДР ТЕСТ, мс	279,325 [269,28; 300,23]	291,775 [281,00; 298,38]	—
ВСДР ТЕСТ, мс	331,675* [323,60; 354,30]	397,95# [390,08; 410,90]	6; -4,598; 0.000004
ВСДР ТЕСТiaf, мс	337,00* [330,20; 365,33]	389,05 [380,90; 409,08]	17; -4,184; 0.000029
ВСДР ТЕСТiaf+2, мс	330,475 [321,58; 359,10]	384,03# [372,13; 400,43]	23; -3,957; 0.000076
SDвсдр ТЕСТ, мс	49,627 [41,81; 53,78]	63,75 [55,11; 73,51]	35; -3,505; 0.000457
SDвсдр ТЕСТiaf, мс	48,731 [39,36; 58,90]	57,30 [50,49; 68,71]	—
SDвсдр ТЕСТiaf+2, мс	44,792 [35,94; 53,97]	53,86 [47,09; 69,06]	—

Примечание. ВПДР — время простой двигательной реакции; ВСДР — время сложной двигательной реакции; ТЕСТ — обычные условия; ТЕСТiaf — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой индивидуального α -пика испытуемого; ТЕСТiaf+2 — стимул в условиях оптической стимуляции с частотой выше индивидуального α -пика испытуемого на 2 Гц; SDвсдр — вариабельность времени сложной двигательной реакции; * достоверные отличия значений ВСДР у испытуемых 1-й группы в ситуации ТЕСТiaf по сравнению с ситуацией ТЕСТ ($T=10,0$; $Z=3,0$; $p=0,0027$); # достоверные отличия значений ВСДР у испытуемых 2-й группы в ситуации ТЕСТiaf+2 по сравнению с ситуацией ТЕСТ ($T=1,0$; $Z=3,46$; $p=0,0005$).