

СОЧЕТАНИЕ ЭЭГ-УПРАВЛЯЕМОЙ АДАПТИВНОЙ НЕЙРОСТИМУЛЯЦИИ С РЕЗОНАНСНЫМ СКАНИРОВАНИЕМ В КОРРЕКЦИИ СТРЕССИНДУЦИРОВАННЫХ СОСТОЯНИЙ И КОГНИТИВНОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ СТУДЕНТОВ УНИВЕРСИТЕТА

С.А.Полевая¹, С.Б.Парин¹, А.И.Федотчев²

¹ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород, РФ; ²Институт биофизики клетки РАН — обособленное подразделение ФГБУН ФИЦ Пушчинский научный центр биологических исследований РАН, Пушкино, РФ

Проведена коррекция стрессиндуцированных состояний и когнитивная реабилитация у студентов университета трёх групп, сопоставимых по количеству, полу и возрасту, в период экзаменационной сессии. В экспериментальной группе использовали сочетание ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции с предварительным резонансным сканированием. В группе контроль 1 применяли только ЭЭГ-управляемую адаптивную нейростимуляцию, в группе контроль 2 предъявляли музыкально-акустические воздействия без обратной связи от ЭЭГ данного испытуемого. При предварительном резонансном сканировании выявлены максимальные позитивные эффекты по сравнению с двумя контрольными видами стимуляции. При этом достоверное увеличение мощности ЭЭГ-ритмов, особенно альфа-диапазона, сопровождалось значимым ростом субъективных показателей состояния и когнитивной деятельности. Полученные данные объясняются с позиций прогрессивного вовлечения резонансных и интеграционных механизмов мозга и механизмов нейропластичности в процессы нормализации функционального состояния организма под влиянием комбинированных стимуляционных процедур.

Ключевые слова: *адаптивная нейростимуляция с обратной связью от электроэнцефалограммы (ЭЭГ); ритмические компоненты ЭЭГ; автоматическая модуляция; когнитивная реабилитация; коррекция состояний*

Стресс — неизбежный спутник современной жизни, вызывающий нарушение многих исполнительских функций, включая рабочую память, принятие решений и контроль внимания [1]. Стресс оказывает пагубное влияние на психоло-

гическое благополучие, когнитивные функции и физиологическое здоровье студентов университета [2]. Особого внимания заслуживает экзаменационный стресс — психофизиологическое состояние в период экзаменационной сессии, оказывающее дестабилизирующее влияние на все психические сферы личности и значительно ухудшающее результаты наиболее важных экзаменов [3]. В состоянии экзаменационного

Адрес для корреспонденции: fedotchev@mail.ru. Федотчев А.И.

DOI 10.47056/0365-9615-2023-175-6-710-714

стресса работоспособность студентов падает, растёт количество допускаемых ошибок, а длительное нервно-психическое напряжение сопровождается тревогой и страхом [4]. Несмотря на широкое распространение университетских программ борьбы со стрессом, некоторые исследователи считают необходимой разработку новых эффективных средств, направленных на своевременную коррекцию стрессиндуцированных состояний и когнитивную реабилитацию студентов [5,6].

Ранее для устранения последствий стресса был разработан и успешно протестирован оригинальный подход к коррекции стрессиндуцированных состояний, предполагающий использование сенсорных воздействий, автоматически модулируемых собственными ритмическими процессами организма человека [7]. Было показано, что объективными преимуществами данного подхода являются его предельная персонализация, вовлечение значимых для человека interoцептивных сигналов в процессы нормализации функций организма, а также автоматическое, без осознанных усилий человека, управление лечебными сенсорными воздействиями. Инновационным вариантом данного подхода, в котором человеку предъявляются аудиовизуальные воздействия, автоматически модулируемые ритмическими компонентами его электроэнцефалограммы (ЭЭГ), является ЭЭГ-управляемая адаптивная нейростимуляция. Хотя данный вид адаптивной нейростимуляции был успешно использован для когнитивной реабилитации больных с посттравматическими стрессовыми состояниями [8], вопрос повышения его эффективности требует дальнейшего изучения.

Поскольку ЭЭГ-управляемая адаптивная нейростимуляция основана на автоматической модуляции сенсорных воздействий собственными ритмическими компонентами ЭЭГ человека, одним из возможных путей повышения её эффективности может быть предварительное усиление модулирующего фактора, т.е. ЭЭГ субъекта. Мы предположили, что с этой целью может быть использован приём фотостимуляции с изменяющейся частотой, который ранее был успешно применён для резонансной активации корковых ритмов у младших школьников — "резонансное сканирование" [9]. Метод заключается в светодиодной фотостимуляции с градуально увеличивающейся частотой в диапазоне основных ЭЭГ-ритмов. Показано, что резонансное сканирование благодаря комбинации динамической фотостимуляции с динами-

ческим анализом ЭЭГ позволяет активировать и выявлять посредством резонанса тонкую структуру индивидуального спектра ЭЭГ для учёта и использования потенциальных резонансно-активных осцилляторов мозга [9].

Цель данной работы — провести сравнительный анализ эффектов, регистрируемых у студентов университета в период экзаменационной сессии под влиянием разных видов сенсорной стимуляции.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проведено в соответствии с Хельсинкской декларацией ВМА (2013 г.) и одобрено этическим комитетом Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского (Протокол № 46 от 11.02.2021 г.). От каждого испытуемого получено письменное информированное согласие.

В исследовании приняли участие студенты Нижегородского государственного университета, которые по результатам предварительного опроса находились в состоянии стресса в период экзаменационной сессии. Группы были равны по составу (по 16 человек) и возрасту (20-22 года). Возможные половые различия были минимизированы за счёт равного представительства лиц каждого пола в группах (7 женщин, 9 мужчин). В 1-й группе (эксперимент) использовали сочетание ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции с предварительным резонансным сканированием. Две другие группы студентов служили контролем. В одной из них (контроль 1) применяли только ЭЭГ-управляемую адаптивную нейростимуляцию без резонансного сканирования, в другой (контроль 2) использовали музыкально-акустические воздействия без обратной связи от ЭЭГ данного испытуемого. Эффекты стимуляции оценивали по изменениям объективных (ЭЭГ) и субъективных (психологическое тестирование) показателей под влиянием стимуляции относительно исходных значений.

Для оценки исходного психофизиологического состояния в начале каждого эксперимента испытуемых опрашивали и проводили психологическое тестирование с использованием трёх апробированных ранее [10] тестов: определяющего в баллах наличный уровень стресса (тест УС), позволяющего участнику количественно оценивать текущее самочувствие, активность и настроение (тест САН) и теста на узнавание слов. После начального тестирования устанавливали ЭЭГ-датчики (активный электрод в отведении

Cz, референтный и заземляющий — на мочках ушей), фиксировали наушники и светодиодные очки, в затемнённые линзы которых были вмонтированы красные светодиоды с мощностью, не превышающей 100 мкВт. Испытуемых просили сидеть спокойно с закрытыми глазами в течение всей процедуры обследования.

Каждый эксперимент начинался с записи фоновой электрической активности мозга при диапазоне фильтрации ЭЭГ 2-32 Гц и частоте дискретизации сигналов 100 Гц, в ходе которой с помощью ранее описанной [8] модификации динамического спектрального анализа, основанного на быстрых преобразованиях Фурье, определялся доминирующий у конкретного испытуемого узкополосный (0.4-0.6 Гц) спектральный компонент в диапазоне альфа-ритма (8-13 Гц) ЭЭГ — альфа-ЭЭГ осциллятор. Дальнейшее обследование зависело от группы, в которую попадал испытуемый.

В 1-й группе (эксперимент) после записи фона начинался процесс резонансного сканирования путём предъявления ритмических световых стимулов по специальной программе. Она предусматривала подачу серий вспышек со ступенчато возрастающей частотой в диапазоне от 4 до 20 Гц с шагом 0.4 Гц. Продолжительность стимуляции на каждом шаге с фиксированной частотой составляла 6 с, общая продолжительность фотостимуляции — 240 с. Затем начиналась ЭЭГ-управляемая адаптивная нейростимуляция в виде аудиовизуальных воздействий, формируемых по принципу двойной обратной связи от ЭЭГ испытуемого [7]. Участникам в течение 4 мин одновременно предъявляли музыкаподобные воздействия, формируемые на основе выявленного альфа-ЭЭГ осциллятора, и ритмическую световую стимуляцию, управляемую суммарной ЭЭГ испытуемого. В группе контроль 1 после записи фона сразу начиналась описанная процедура ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции, которая продолжалась около 8 мин. В группе контроль 2 после записи фона участникам в течение 8 мин предъявляли заранее подготовленный музыкаподобный сигнал, сгенерированный на основе альфа-ЭЭГ осциллятора другого испытуемого, находящегося в нормальном состоянии.

По окончании стимуляции регистрацию ЭЭГ продолжали в течение 1-2 мин для измерения эффектов последствия, после чего проводили опрос испытуемых об их ощущениях во время сеансов.

Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью пакета про-

грамм SigmaPlot 11.0. Для проверки нормальности распределения признаков применяли W критерий Шапиро—Уилка, поскольку он обладает наибольшей мощностью и является наиболее предпочтительным при небольших выборках. Анализируемое распределение признака оценивалось как нормальное при $p > 0.05$. В случае нормального распределения данных для описательной статистики признаков использовали среднее (M) и стандартную ошибку (SE), для оценки достоверности различий — t критерий Стьюдента. В случае распределения, отличного от нормального, для оценки достоверности различий использовали U критерий Манна—Уитни. За критический уровень статистической значимости принимался уровень при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Индивидуальные особенности реакций ЭЭГ анализировали путём последовательного вычисления спектров ЭЭГ и спектров стимуляции по ходу каждого обследования, что позволяло наглядно сопоставлять их динамики. Типичный пример такой спектральной динамики для испытуемого из экспериментальной группы представлен на рисунке. После двухминутной фоновой записи начиналось резонансное сканирование. По мере увеличения частоты стимуляции в спектрах ЭЭГ наблюдались резонансные спектральные пики, точно совпадающие по частоте с действующей в данный момент частотой стимуляции (реакция усвоения ритма). Кроме того, резонансные спектральные пики наблюдались также на частоте второй гармоники стимуляции (реакция мультипликации ритма). Эти спектральные пики образуют наклонные прямые линии (рисунок, *a*), отражающие резонансную активацию отдельных спектральных компонентов ЭЭГ, совпадающих по частоте с действующей частотой стимуляции и её гармоники. После короткой паузы начинался процесс адаптивной нейростимуляции, при котором локальные резонансные пики на спектральных ЭЭГ кривых напоминают спектральные пики, регистрируемые для динамики стимуляции. Важно отметить, что после резонансного сканирования происходил рост спектральных амплитуд ЭЭГ относительно исходного фона (рисунок), чего не наблюдалось в группах контроля.

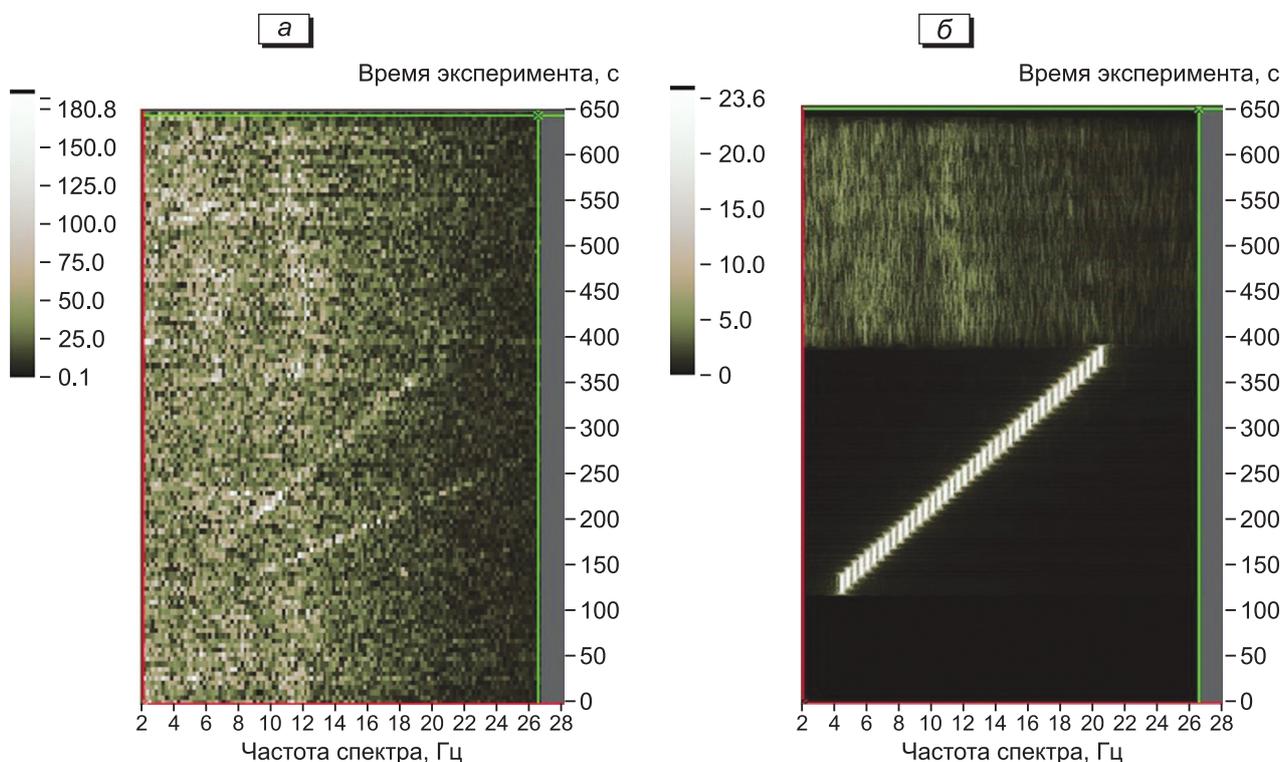
Экспериментальная группа отличалась от контрольных также по изменениям субъективных показателей состояния под влиянием каждого вида стимуляции (таблица). Под влия-

нием сочетания резонансного сканирования с ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляцией отмечались максимальные позитивные сдвиги всех субъективных показателей. Так, достоверно снизился уровень стресса, значимо сократилось число ошибок в тесте на узнавание слов, а также достоверно возросли оценки самочувствия и активности испытуемых. В группе, где предварительное резонансное сканирование отсутствовало (контроль 1), значимо увеличились оценки самочувствия. В группе контроль 2 отмечены минимальные сдвиги всех показателей.

При опросе испытуемых о субъективных ощущениях в ходе экспериментов выяснилось, что все участники оценили проводимые процедуры как приятные, интересные и успокаиваю-

щие, особенно эксперименты с резонансным сканированием.

Таким образом, полученные результаты подтверждают предположение о том, что резонансное сканирование повышает эффективность ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляции при коррекции стрессиндуцированных состояний и когнитивной реабилитации студентов университета. При сочетании резонансного сканирования с ЭЭГ-управляемой адаптивной нейростимуляцией происходит рост мощности ритмов ЭЭГ, особенно выраженный для альфа-диапазона ЭЭГ, сопровождаемый снижением уровня стресса, улучшением эмоционального состояния и показателей когнитивной деятельности. В процессе комбинированных стимуляционных процедур благодаря взаимодействию



Динамика спектров ЭЭГ (а) и стимуляции (б) в ходе обследования испытуемого № R101. Ось Z — спектральная плотность, отражённая в интенсивности окраски.

Изменение показателей психологического тестирования после стимуляции относительно исходного уровня у испытуемых ($M \pm SE$; %)

Показатель	Группа испытуемых		
	Эксперимент	Контроль 1	Контроль 2
Уровень стрессированности	-40.0±12.5 ($p=0.004$)	-10.9±5.6	-9.0±6.8
Ошибки при узнавании слов	-25.9±5.5 ($p=0.002$)	-5.4±3.7	-3.7±5.4
Тест САН: оценка самочувствия	5.8±2.0 ($p=0.013$)	3.2±1.0*	0.8±0.6
Тест САН: оценка активности	2.6±0.8 ($p=0.009$)	2.0±1.0	-1.0±0.8
Тест САН: оценка настроения	4.2±2.4	1.0±0.8	0.8±0.6

Примечание. * $p=0.014$.

эндогенных и экзогенных осцилляций у испытуемых происходит постепенное формирование состояния релаксации с повышенным самосознанием и сосредоточенностью [11,12].

Следует отметить, что аналогичные результаты были получены при использовании музыкального нейробиоуправления у здоровых людей [13]. Однако исследователи добились успешной индукции альфа-волн и последующего улучшения когнитивных функций после длительного периода обучения, тогда как в проведённом нами исследовании такие эффекты были достигнуты после однократной процедуры за счёт прогрессивного вовлечения резонансных и интеграционных механизмов и механизмов нейропластичности.

Разработанный комбинированный подход к нейростимуляции может быть использован в реабилитационных мероприятиях широкого профиля, в военной и спортивной медицине, медицине катастроф, научных исследованиях.

Работа выполнена при поддержке РНФ (проект № 22-18-20075).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Can Y.S., Iles-Smith H., Chalabianloo N., Ekiz D., Fernández-Álvarez J., Repetto C., Riva G., Ersoy C.* How to Relax in Stressful Situations: A Smart Stress Reduction System // *Healthcare (Basel)*. 2020. Vol. 8, N 2. ID 100. doi: 10.3390/healthcare8020100
2. *Dutton L.L., Anderson C.E.* How stressed are they?: Levels and sources of stress in doctor of physical therapy students // *J. Allied Health*. 2021. Vol. 50, N 4. P. 277-283.
3. *Lampe L.C., Müller-Hilke B.* Mindfulness-based intervention helps preclinical medical students to contain stress, maintain mindfulness and improve academic success // *BMC Med. Educ.* 2021. Vol. 21, N 1. P. 145. doi: 10.1186/s12909-021-02578-y
4. *Миронова О.И.* Подходы к изучению экзаменационного стресса у студентов // *Педагогика и психология образования*. 2021. № 1. С. 159-170. doi: 10.31862/2500-297X-2021-1-159-170
5. *Dawson A.F., Brown W.W., Anderson J., Datta B., Donald J.N., Hong K., Allan S., Mole T.B., Jones P.B., Galante J.* Mindfulness-based interventions for university students: A systematic review and meta-analysis of randomised controlled trials // *Appl. Psychol. Health Well Being*. 2020. Vol. 12, N 2. P. 384-410. doi: 10.1111/aphw.12188
6. *Oliveira E.S., Silva A.F.R.D., Silva K.C.B.D., Moura T.V.C., Araújo A.L., Silva A.R.V.D.* Stress and health risk behaviors among university students // *Rev. Bras. Enferm.* 2020. Vol. 73, N 1. ID e20180035. doi: 10.1590/0034-7167-2018-0035
7. *Федотчев А.И.* Коррекция стресс-индуцированных состояний сенсорными воздействиями, автоматически модулируемыми эндогенными ритмами человека // *Журн. высш. нерв. деят.* 2022. Т. 72, № 1. С. 3-10. doi: 10.31857/S0044467721060034
8. *Fedotchev A.I., Parin S.B., Poleyaya S.A.* Adaptive neurostimulation methods in correcting posttraumatic stress disorder and professional burnout syndrome // *Opera Med. Physiol.* 2021. Vol. 8, N 2. P. 68-74. doi: 10.24412/2500-2295-2021-2-68-74
9. *Савчук Л.В., Полевая С.А., Парин С.Б., Бондарь А.Т., Федотчев А.И.* Резонансное сканирование и анализ электроэнцефалограммы при определении зрелости корковой ритмики у младших школьников // *Биофизика*. 2022. Т. 67, № 2. С. 354-361. doi: 10.31857/S0006302922020181
10. *Катаев А.А., Бахчин А.В., Полевая С.А., Федотчев А.И.* Связь между субъективными и объективными оценками функционального состояния человека (апробация методики экспресс-оценки уровня стрессированности) // *Вестник психофизиол.* 2017. № 2. С. 62-67.
11. *Kawala-Sterniuk A., Browarska N., Al-Bakri A., Pelc M., Zygarlicki J., Sidikova M., Martinek R., Gorzelanczyk E.J.* Summary of over fifty years with brain-computer interfaces — a review // *Brain Sci.* 2021. Vol. 11, N 1. ID 43. doi: 10.3390/brainsci11010043
12. *Нуйдель И.В., Колосов А.В., Демарева В.А., Яхно В.Г.* Применение феноменологической математической модели для воспроизведения эффекта взаимодействия эндогенных и экзогенных осцилляций при нейробиоуправлении // *Соврем. технол. в медицине*. 2019. Т. 11, № 1. С. 103-108. doi: 10.17691/stm2019.11.1.12
13. *Takabatake K., Kunii N., Nakatomi H., Shimada S., Yanai K., Takasago M., Saito N.* Musical auditory alpha wave neurofeedback: validation and cognitive perspectives // *Appl. Psychophysiol. Biofeedback*. 2021. Vol. 46, N 4. P. 323-334. doi: 10.1007/s10484-021-09507-1