

ISSN 0131-1646

Том 49, Номер 3

Май - Июнь 2023



ФИЗИОЛОГИЯ ЧЕЛОВЕКА

www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 49, номер 3, 2023

Май–Июнь

Статьи журнала по соглашению авторов с компанией Pleiades Publishing, Inc. публикуются на английском языке в журнале “*Human Physiology*” ISSN 0362-1197, Pleiades Publishing, Inc.

Изменения спектра ЭЭГ, связанные с прослушиванием слов, у типично развивающихся детей и детей с сенсорной алалией

М. А. Начарова, Д. В. Начаров, В. Б. Павленко 5

Оценка эмоциональной сферы детей с типичным развитием и расстройствами аутистического спектра на основании междисциплинарного подхода

О. В. Фролова, Е. А. Клешиев, А. С. Григорьев, Ю. О. Филатова, Е. Е. Ляксо 13

Особенности понимания речи у младших школьников с РАС и их связь с характеристиками ЭЭГ. Часть I

*Е. Ю. Давыдова, К. Р. Салимова, Д. В. Давыдов, Д. С. Переверзева,
У. А. Мамохина, К. К. Данилина, С. А. Тюшкевич, Н. Л. Горбачевская* 23

Окуломоторные референты деятельности чтения у детей с дислексией 9–11 лет

С. Р. Оганов, А. Н. Корнев 34

Возрастная динамика различных компонентов речевой системы и их связь с состоянием управляющих функций мозга у старших дошкольников

М. Н. Захарова, А. Р. Агрис 42

Нейрофизиологические характеристики “переработки” метафорического смысла изображений в оригинальные названия

Ж. В. Нагорнова, В. А. Галкин, Н. В. Шемякина 52

Связанные с событиями потенциалы мозга человека при сравнении зрительных стимулов

И. С. Никишена, В. А. Пономарев, Ю. Д. Кропотов 67

Роль зоны Брока и ее правополушарного гомолога в усвоении абстрактной и конкретной семантики: данные транскраниальной электрической стимуляции

Д. С. Гнедых, Е. Д. Благовещенский, С. Н. Костромина, Н. А. Мкртычян, Ю. Ю. Штыров 78

Влияние визуальной оценки расстояния до слушателя на частоту основного тона голоса диктора в условиях шума

А. М. Луничкин, А. П. Гвоздева, И. Г. Андреева 87

Ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция первичной моторной коры избирательно влияет на усвоение новых слов в разных средах обучения

*Е. И. Перикова, Е. Н. Блинова, Е. А. Андрющенко, Е. Д. Благовещенский,
О. В. Шербакова, Ю. Ю. Штыров* 96

Дифференциация функциональных систем речи и языка и изучение различий обеспечивающих их нейросетей

И. Г. Маланчук, В. А. Орлов, С. И. Карташов, Д. Г. Малахов 106

Фронтально-париетальные паттерны дельта- и бета-осцилляций ЭЭГ как маркеры стратегий креативности

О. М. Разумникова 117

ОБЗОРЫ

Энцефалопатия недоношенных детей как неочевидная причина когнитивных и поведенческих расстройств

А. Б. Пальчик

126

ХРОНИКА

X Всероссийская научно-практическая конференция “Центральные механизмы речи”, посвященная памяти профессора Н.Н. Трауготт

Е. И. Гальперина

134

CONTENTS

Vol. 49, No. 3, 2023

May–June

A simultaneous English language translation of this journal is available from Pleiades Publishing, Inc.

Distributed worldwide by Springer. *Human Physiology* ISSN 0362-1197.

Words Listening Related Electroencephalography Spectrum Perturbations
in Normally Developing Children and Sensory Alalia Children

M. A. Nacharova, D. V. Nacharov, V. B. Pavlenko 5

Assessment of the Emotional Sphere of Children with Typical Development and Autism
Spectrum Disorders Based on an Interdisciplinary Approach

O. V. Frolova, E. A. Kleshnev, A. S. Grigorev, Yu. O. Filatova, E. E. Lyakso 13

Speech Understanding in Primary Schoolchildren with Autism Spectrum Disorders
and Its Relationship with EEG Characteristics. Part I

*E. Yu. Davydova, K. R. Salimova, D. V. Davydov, D. S. Pereverzeva, U. A. Mamokhina,
K. K. Danilina, S. A. Tyushkevich, N. L. Gorbachevskaya* 23

Oculomotor Referents of Reading Activity in Children with Dyslexia Aged 9–11

S. R. Oganov, A. N. Kornev 34

The Development of Various Speech Components and Their Relations with the State
of the Brain Executive Functions in Senior Preschool Age

M. N. Zakharova, A. R. Agris 42

Neurophysiological Characteristics of “Transferring” the Metaphorical Meaning
of Images Into Original Titles

Zh. V. Nagornova, V. A. Galkin, N. V. Shemyakina 52

Event-Related Potentials of the Human Brain During the Comparison of Visual Stimuli

I. S. Nikishena, V. A. Ponomarev, J. D. Kropotov 67

The Involvement of Broca’s Area and Its Right-Hemispheric Homologue in Acquiring
Abstract and Concrete Semantics: Transcranial Direct-Current Stimulation Study

*D. S. Gnedykh, E. D. Blagovechtchenski, S. N. Kostromina,
N. A. Mkrtichian, Y. Y. Shtyrov* 78

The Impact of Visual Estimates of Talker-to-Listener Distance on Fundamental
Frequency in Noise

A. M. Lunichkin, A. P. Gvozdeva, I. G. Andreeva 87

Continuous Theta-Burst Stimulation of the Primary Motor Cortex Induces Specific Influence
on Novel Vocabulary Acquisition in Different Learning Environments

*E. I. Perikova, E. N. Blinova, E. A. Andriushchenko, E. D. Blagovechtchenski,
O. V. Shcherbakova, Y. Y. Shtyrov* 96

Differentiation of the Functional Systems of Speech and Language and the Study
of the Differences of the Neural Networks That Support Them

I. G. Malanchuk, V. A. Orlov, S. I. Kartashov, D. G. Malakhov 106

Fronto-Parietal Patterns of Delta and Beta EEG Oscillations as Correlates
of the Conditions of Creativity Testing

O. M. Razumnikova 117

REVIEWS

Encephalopathy of Prematurity: Invisible Cause of the Cognitive
and Behavioural Disorders

A. B. Palchik

126

CHONICLE

10th Scientific and Practical Conference “Central Mechanisms of Speech”,
Dedicated to the Memory of Professor N.N. Traugott

E. I. Galperina

134

ИЗМЕНЕНИЯ СПЕКТРА ЭЭГ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОСЛУШИВАНИЕМ СЛОВ, У ТИПИЧНО РАЗВИВАЮЩИХСЯ ДЕТЕЙ И ДЕТЕЙ С СЕНСОРНОЙ АЛАЛИЕЙ

© 2023 г. М. А. Начарова¹, *, Д. В. Начаров², В. Б. Павленко¹

¹Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

²Севастопольский государственный университет, Севастополь, Россия

*E-mail: alikina93@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 12.01.2023 г.

Проведен анализ связанных с событиями изменений спектра электроэнцефалограммы (ЭЭГ) во время прослушивания слов-существительных у 23 типично развивающихся детей и 23 детей с сенсорной алалией в возрасте от 4 до 10 лет. В θ -диапазоне ЭЭГ здоровых детей выявлена синхронизация в лобных, центральных и височных отведениях, а в большинстве отведений у детей с сенсорной алалией — десинхронизация. Межгрупповые различия в реактивности θ -диапазона ЭЭГ достигали уровня статистической значимости в отведении C_4 . В α -диапазоне у типично развивающихся детей наблюдалась десинхронизация ЭЭГ, у детей с сенсорной алалией — синхронизация. Различия в мощности α -активности достигали уровня статистической значимости в отведениях C_3 , F_3 , P_3 , O_1 . Снижение синхронизации в θ -диапазоне ЭЭГ во время прослушивания слов у детей с сенсорной алалией может отражать нарушение процессов извлечения слов из памяти и меньшую эмоциональную вовлеченность в процесс восприятия речи, тогда как отсутствие десинхронизации α -активности в центральных отведениях — нарушение функционирования сенсомоторных нейронных сетей, участвующих в восприятии и генерации речи. Выявленные особенности реактивности ЭЭГ важны для понимания центральных механизмов восприятия речи у детей в норме, а также при таких нарушениях, как сенсорная алалия.

Ключевые слова: речь, дети, ЭЭГ, θ -активность, α -активность, сенсорная алалия.

DOI: 10.31857/S0131164622600835, **EDN:** GDMIAG

Речь является необходимым компонентом познавательной деятельности человека [1], а степень развитие речевой сферы — определяющим фактором уровня когнитивного и социального развития ребенка [2]. Ключевым элементом в процессе становления речи считают формирование у детей способности к восприятию и пониманию речевых сигналов [3]. Трудности понимания обращенной речи являются основным проявлением тяжелого детского языкового расстройства — нарушения рецептивной речи ($F80.20$ по МКБ-10), или импрессивной (сенсорной) алалии [4]. Предполагают, что у детей с сенсорной алалией нарушены функции центра Вернике и межполушарные связи, при этом не нарушен слух и первично сохранен интеллект [5, 6]. При этом у значительной части детей с алалией не выявлены очаговые поражения мозга [6].

Несмотря на имеющиеся данные о связи нарушений рецептивной речи с частотой выявления эпилептиформных и локальных патологиче-

ских изменений электроэнцефалограммы (ЭЭГ) (с преобладанием в височных областях) [5], дезорганизацией α -ритма ЭЭГ и наличием билатерально-синхронных генерализованных волн в θ -диапазоне ЭЭГ [7], специфические паттерны ЭЭГ у детей с нарушением рецептивной речи до сих пор не выявлены. Особый интерес представляет исследование паттернов ЭЭГ в процессе речевого восприятия у тех детей с нарушением рецептивной речи, у которых не выявлено патологической ЭЭГ-активности во время стандартного клинического обследования.

Одним из перспективных направлений исследований является анализ изменений спектра ЭЭГ, связанных с прослушиванием слов. Такой анализ позволяет с достаточно высоким временным разрешением выявить изменения электрической активности неокортекса, сопровождающие процессы восприятия речи. Известно, что процесс обработки речевого сигнала отражается в синхронизации θ -ритма в лобно-центральных и височных

отведениях левого полушария через 300–900 мс от начала его предъявления. Такое фазное увеличение мощности указанного ритма связывают с лексическим поиском и извлечением слов из рабочей памяти [8, 9]. Десинхронизация α - и β -ритмов, во время восприятия слов, как предполагает ряд авторов [10–12], отражает процессы внимания по отношению к речи и обработку лингвистической информации.

Важно отметить, что работы, направленные на изучение реактивности электрической активности мозга у детей с различного рода нарушениями восприятия речи, относительно немногочисленны. Так, у детей, имеющих сложности с восприятием и запоминанием слов, выявлены более выраженные, по сравнению с ЭЭГ-реакциями здоровых сверстников, десинхронизация α -ритма и снижение синхронизации θ - и β -ритмов, что явилось основанием для предположения об использовании ими некой измененной стратегии обработки речевой информации [10]. В исследовании с использованием магнитоэнцефалографии у подростков с расстройством аутистического спектра (РАС) во время чтения слов выявлена более выраженная, чем у типично развивающихся детей, синхронизация θ -ритма в лобно-височных зонах. Учитывая то, что дети с РАС продемонстрировали более низкую точность распознавания слов, увеличение синхронизации θ -ритма связывают с необходимостью компенсаторного вовлечения отдельных зон мозга во время лексико-семантического поиска слов и необходимостью дополнительного задействования процессов когнитивного контроля [13].

Анализ ЭЭГ детей с сенсорной алалией основан, главным образом, на записях, полученных в условиях относительного покоя, а не в ситуациях восприятия речи [5, 7]. В связи с этим целью настоящего исследования является анализ связанных с событиями изменений мощности спектра ЭЭГ во время восприятия слов-существительных у типично развивающихся детей и детей с сенсорной алалией или нарушением рецептивной речи (F80.2).

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 23 типично развивающихся ребенка (17 мальчиков и 6 девочек) и 23 ребенка (17 мальчиков и 6 девочек) с установленным диагнозом “Расстройство рецептивной речи” (F80.2) в возрасте от четырех до десяти лет. Средний возраст в обеих группах значимо не различался и составил 6.51 ± 1.77 и 6.54 ± 1.79 лет (здесь и далее указаны среднее значение $\pm$ стандартное отклонение). Все дети были правшами, имели нормальные или приближающиеся к нормальным показатели зрения и слуха. В указанные группы не были включены дети с

массой тела при рождении менее 2.5 кг, с наличием генетических заболеваний, а также те дети, в ЭЭГ которых во время клинических обследований были выявлены эпизоды эпилептиформной активности.

Регистрацию ЭЭГ проводили с помощью электроэнцефалографа Нейрон-Спектр-3 (“Нейрософт”, Россия) монополярно в соответствии с международной системой 10–20 в лобных (Fp_1 , Fp_2 , Fz , F_3 , F_4 , F_7 , F_8), центральных (Cz , C_3 , C_4), височных (T_3 , T_4 , T_5 , T_6), теменных (Pz , P_3 , P_4) и затылочных (O_1 , O_2) отведениях. В качестве референтного использовали объединенный ушной электрод. Соппротивление электродов не превышало 5 кОм. Частота дискретизации составляла 1000 Гц.

Испытуемых просили сидеть спокойно, глядя перед собой, и внимательно слушать аудиозапись речи, которую предъявляли с использованием акустических колонок. В качестве стимулов были подобраны 30 часто употребляемых конкретных слов-существительных, знакомых детям четырех лет (мяч, яблоко, стол, дом и т.п.). Средняя продолжительность слов составляла 296 ± 84 мс. Межстимульный интервал составлял 4000–5000 мс.

Анализ ЭЭГ-данных проводили с помощью программы *EEGLAB* (<http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/>). Записи ЭЭГ были отфильтрованы в диапазоне от 1 до 50 Гц, артефакты удаляли с помощью метода анализа независимых компонент. Непрерывную запись ЭЭГ разбивали на эпохи длительностью 4000 мс, соответствующие моментам предъявления стимулов. Предстимульный интервал имел длительность 1000 мс, постстимульным интервалом являлся отрезок времени длительностью 3000 мс от момента начала предъявления слова. Связанные с событием спектральные пертурбации (СССП) ЭЭГ выявляли с помощью частотно-временного анализа на основе вейвлета Морле. Показатели СССП рассчитывали как логарифм отношения мощностей ритмических диапазонов постстимульной и предстимульной ЭЭГ. Анализировали θ (3–8 Гц)- и α (8–13 Гц)-диапазоны ЭЭГ [14].

Отрицательные значения СССП соответствуют десинхронизации ЭЭГ, положительные значения – синхронизации. При оценке различий СССП обследованных групп детей для уменьшения искажений, связанных с множественными сравнениями, использовали пермутационную статистику ($n = 2000$), значимыми считали различия при $p < 0.001$ [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ связанных с событием спектральных пертурбаций. Анализ СССП в группе типично развивающихся детей показал увеличение мощности колебаний в диапазоне θ -активности ЭЭГ во вре-

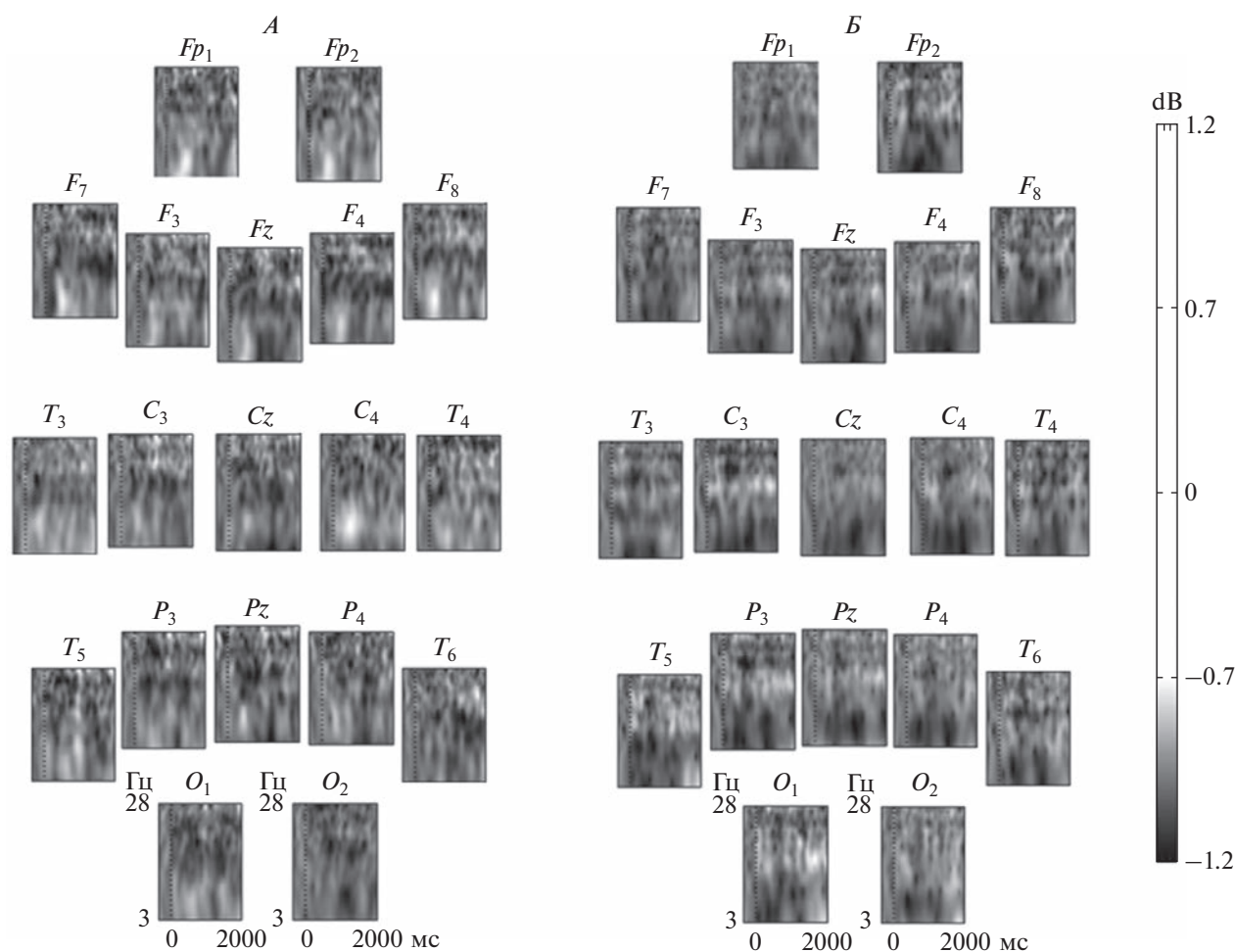


Рис. 1. Связанные с прослушиванием слов спектральные пертурбации у 23 типично развивающихся детей (А) и у 23 испытуемых с нарушением рецептивной речи (Б).

Каждый фрагмент рисунка соответствует временному промежутку от -500 до 2500 мс от начала стимула и диапазону частот от 3 до 28 Гц. В правой части рисунка — шкала, отражающая логарифм отношения мощностей ритмических диапазонов постстимульной и предстимульной ЭЭГ в дБ.

менном интервале $300\text{--}700$ мс после начала стимула в лобных, центральных и височных отведениях. У детей с расстройством рецептивной речи в большинстве отведений наблюдалось уменьшение мощности ЭЭГ в θ -диапазоне после предъявления стимула (рис. 1).

Различия в мощности ЭЭГ θ -диапазона у детей исследуемых групп достигали уровня статистической значимости на уровне $p < 0.001$ в отведении C_4 ($520\text{--}855$ мс) (рис. 2). Как видно из рис. 2 в группе типично развивающихся детей выраженная синхронизация θ -активности наблюдалась в данном отведении примерно через 550 мс после предъявления стимула, тогда как у детей с нарушением рецептивной речи синхронизации ЭЭГ в θ -диапазоне зарегистрировано не было.

Во время прослушивания слов в группе типично развивающихся детей наблюдалась десинхронизация ритмической активности ЭЭГ в α -диа-

пазоне, наиболее выраженная в лобных, центральных и височных отведениях примерно через 200 мс после начала стимула (рис. 1), тогда как у детей с нарушением рецептивной речи — синхронизация α -активности в большинстве отведений ЭЭГ (рис. 3). Различия в мощности ЭЭГ α -диапазона достигали уровня статистической значимости в отведениях C_3 (временные интервалы $250\text{--}450$ и $1750\text{--}1810$ мс), F_3 ($400\text{--}426$, $2300\text{--}2370$ мс), P_3 ($1720\text{--}1800$ мс), O_1 ($1690\text{--}1850$ мс).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во время прослушивания слов в группе типично развивающихся детей практически во всех отведениях наблюдалась синхронизация θ -активности и десинхронизация в α -диапазоне ЭЭГ, наиболее выраженная в лобных, центральных и височных отведениях, тогда как у детей с наруше-

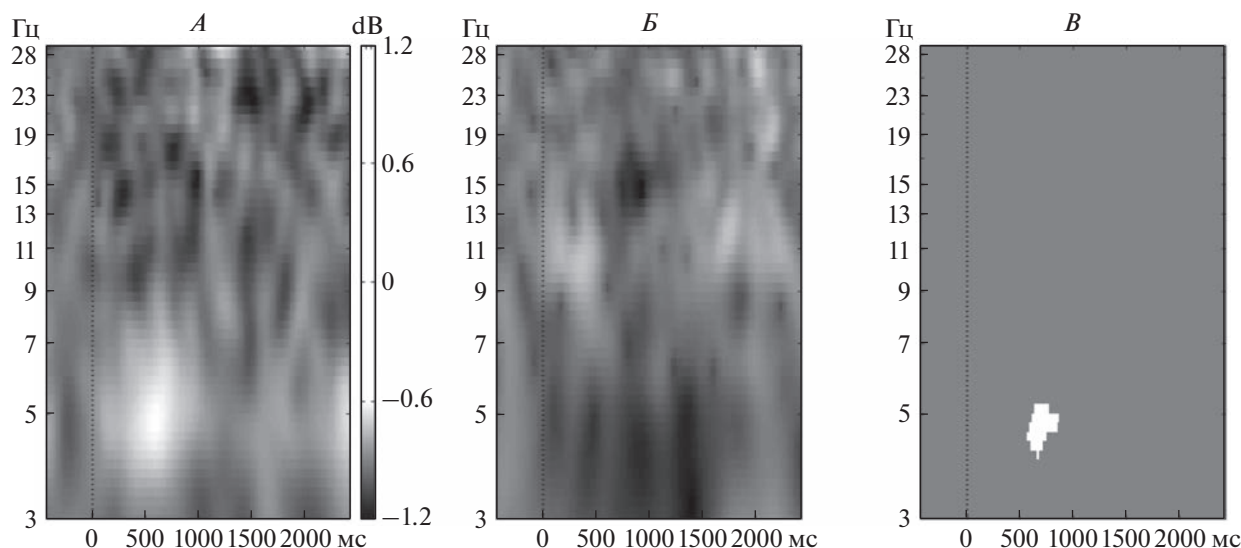


Рис. 2. Связанные с прослушиванием слов спектральные пертурбации у детей в норме (А) и с сенсорной алалией (Б), межгрупповые различия $p < 0.001$ (В) в отведении C_4 . Остальные обозначения см. рис. 1.

нием рецептивной речи — синхронизация α -активности в большинстве отведений ЭЭГ.

Выявленная в большинстве отведений синхронизация в θ -диапазоне ЭЭГ во временном интервале 300–700 мс после начала стимула согласуется с данными, полученными во многих исследованиях и, предположительно, связана с лексико-семантическими операциями поиска и извлечения слов из памяти [16].

В отличие от преимущественно левосторонней синхронизации ЭЭГ в θ -диапазоне при обработке речи у взрослых, у детей в возрасте 10–12 лет во время произнесения грамматически правильных предложений синхронизация θ -активности была выявлена в правой лобно-центральной области [17]. В другой работе было установлено, что обнаруженная у детей в возрасте 8–11 лет правосторонняя синхронизация θ -активности становится менее выраженной к 12–13 годам. Исследователями сделано предположение, что для обработки речи дети используют нейронные сети, структурно и функционально отличающиеся от таковых у взрослых [16]. Результаты настоящего исследования с участием типично развивающихся детей 4–10 лет подтверждают важную роль структур правого полушария в процессе обработки речи — именно в центральных отведениях правого полушария была выявлена наибольшая синхронизация θ -активности примерно через 550 мс после начала предъявления слов, а в отведении C_4 — выявлены различия в реактивности θ -диапазона ЭЭГ в группах типично развивающихся детей и детей с сенсорной алалией.

Согласно данным мета-анализа 128 исследований [18], правое полушарие участвует в процессах обработки просодики речи, а также интеграции информации с учетом ее контекста, что необходимо для построения полного представления о значении высказываний. При этом в большинстве публикаций активацию правого полушария связывают не со специфическими процессами обработки вербальной информации, а с привлечением дополнительных ресурсов внимания и/или рабочей памяти [18]. Другой мета-анализ выявил зоны в лобной коре правого полушария, участвующие в процессах понимания речи, однако это касалось анализа сложных предложений [19]. В значительном количестве работ показана связь синхронизации θ -активности с процессами внимания, эмоциональными реакциями [20], в том числе во время восприятия эмоционально окрашенных предложений [21]. Учитывая то, что в настоящем исследовании дети прослушивали простые слова, отличия, выявленные в группе детей с сенсорной алалией, можно связать с общим снижением концентрации внимания детей на выполнении вербального задания и нарушением процесса лексико-семантического поиска и извлечения слов из памяти.

По мнению некоторых авторов, одной из причин нарушений понимания речи у детей может являться незрелость правополушарного механизма слухового восприятия [6], что, вместе с полученными в настоящем исследовании данными, подчеркивает важную роль функций правого полушария в механизмах нарушения понимания речи у детей с сенсорной алалией.

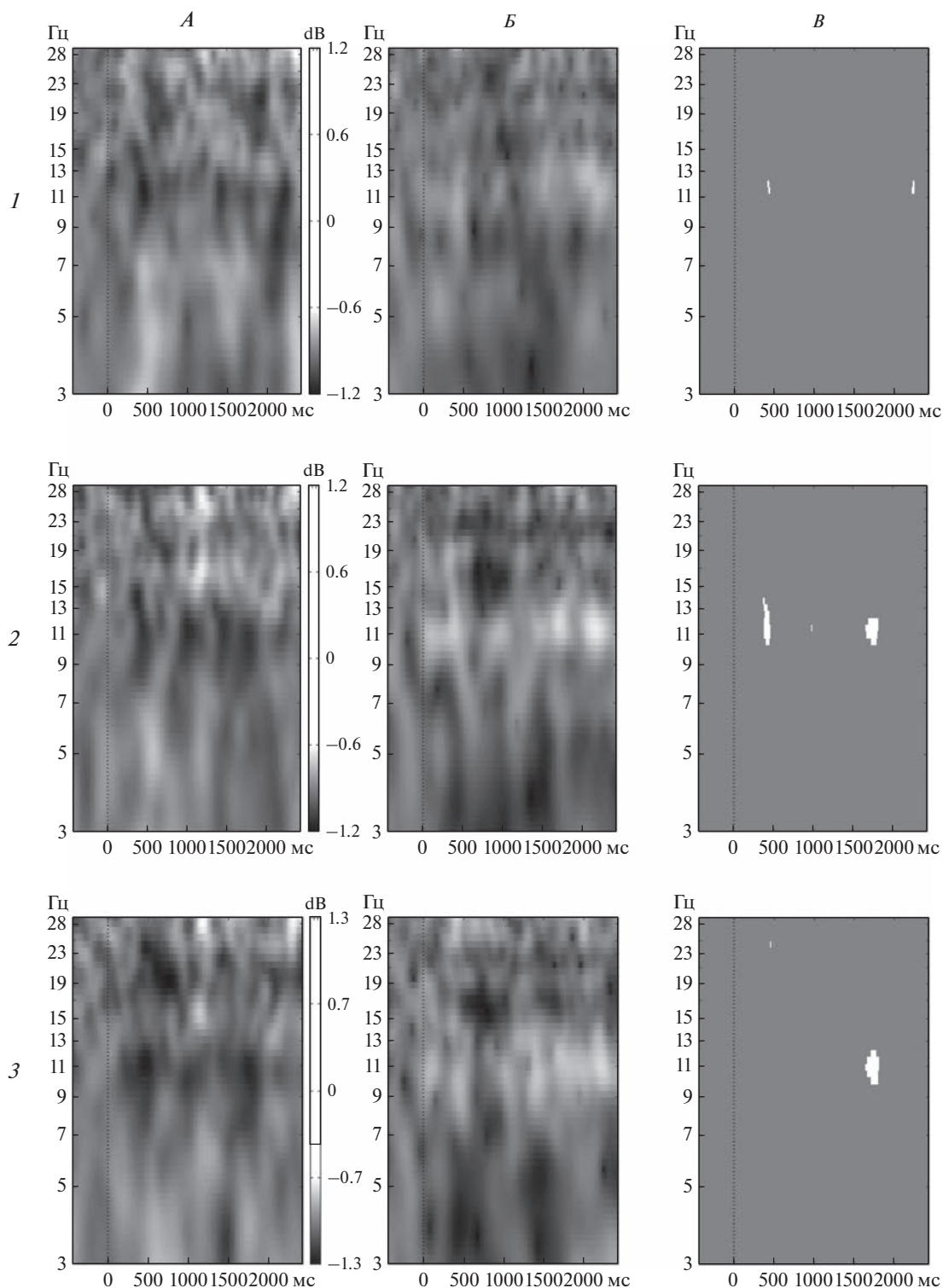


Рис. 3. Связанные с прослушиванием слов спектральные пертурбации у детей в норме (А) и с сенсорной алалией (Б), межгрупповые различия $p < 0.001$ (Б) в отведениях F_3 (1), C_3 (2), P_3 (3). Остальные обозначения см. рис. 1.

Следует отметить, что если у детей с РАС и наблюдается более выраженная связанная с пониманием слов синхронизация θ -диапазона ЭЭГ [13],

то у детей с нарушением рецептивной речи синхронизация θ -активности практически не регистрируется, что позволяет предположить отличие моз-

говых механизмов нарушений понимания обращенной речи у детей с РАС и сенсорной алалией.

Десинхронизация α -активности в центрально-теменных и затылочных отведениях в ответ на предъявление слов может отражать как процессы внимания [11], так и процессы, специфически связанные с восприятием речи. Так, было показано, что восприятие речевых сигналов вызывает более значимую десинхронизацию сенсомоторного α - и β -ритмов через 400–600 мс после их предъявления по сравнению с восприятием неречевых стимулов [22].

Стоит отметить, что все существительные были знакомы детям: большая часть названных предметов использовалась детьми в быту и имела определенный визуальный и кинестетический образ. Поэтому у детей с нормальным уровнем развития речи вовлечение моторных зон в процесс восприятия слов-существительных может быть вызвано активацией моторного репертуара, связанного с этими словами (мяч – пинать, бросать, ловить; карандаш – рисовать, держать, сжимать и т.д.) [23].

Другой причиной активации моторных областей при прослушивании речи может быть ее внутреннее воспроизведение (“проговаривание”). Так, ранее выявлено увеличение амплитуды моторных вызванных потенциалов от мышц губ и языка во время прослушивания речи [24], а также активация премоторной коры левого полушария как при проговаривании, так и при прослушивании слогов [25]. Кроме этого, исследования с использованием транскраниальной магнитной стимуляции показали, что различение речевых звуков нарушается при воздействии на артикуляционные моторные зоны [26]. В связи с этим были выдвинуты предположения об участии артикуляционных моторных областей в процессах понимания речи [27].

Отсутствие во время прослушивания предъявленных слов у детей с сенсорной алалией значимых изменений α -активности в лобных-центральных отведениях левого полушария может быть связано с меньшей актуализацией ассоциированного со словами моторного репертуара и снижением активации артикуляционных моторных зон, а снижение реактивности ЭЭГ α -диапазона в теменно-затылочных отведениях – со снижением внимания детей с нарушением понимания речи к прослушиванию слов. При этом вопрос о причинах изменения реактивности ЭЭГ в данном частотном диапазоне требует дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

1. Во время прослушивания слов у типично развивающихся детей наблюдается синхронизация

θ -активности во временном интервале 300–700 мс от начала предъявления стимула и десинхронизация в α -диапазоне ЭЭГ с латентным периодом около 200 мс, наиболее выраженная в лобных, центральных и височных отведениях.

2. Отсутствие синхронизации ЭЭГ в θ -диапазоне во время прослушивания слов у детей с сенсорной алалией может отражать нарушение процессов извлечения слов из памяти и меньшую эмоциональную вовлеченность в процесс восприятия речи.

3. Отсутствие у детей с сенсорной алалией десинхронизации α -активности в лобных, центральных и теменных отведениях, предположительно, отражает снижение внимания к речи и меньшее вовлечение в процесс восприятия слов артикуляционных моторных зон.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным комитетом по биоэтике Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского (Симферополь). Протокол заседания комитета № 10 от 4 ноября 2019 г.

Информированное согласие. Каждый родитель участника исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. М.А. Начарова – набор и обработка данных, написание статьи. Д.В. Начаров – обработка данных, написание статьи. В.Б. Павленко – планирование исследования, написание статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ушакова Т.Н. Рождение слова: Проблемы психологии речи и психолингвистики. М.: Институт психологии РАН, 2011. 524 с.
2. Burchinal M., Foster T.J., Bezdek K.G. et al. School-entry skills predicting school-age academic and social-emotional trajectories // Early Child. Res. Q. 2020. V. 51. P. 67.
3. Станкова Е.П., Гийемар Д.М., Гальперина Е.И. Морфофункциональные основы анализа сложных предложений у взрослых и детей // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 3. С. 111.
Stankova E.P., Guillemard D.M., Galperina E.I. Morpho-functional basis of complex sentence processing in adults and children // Human Physiology. 2020. V. 46. № 3. P. 332.

4. *Александрова Н.Ш., Александрова О.А.* Импрессивная (сенсорная) алалия // Журн. неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2016. Т. 116. № 11. С. 114.
Aleksandrova N.Sh., Aleksandrova O.A. [Impressive (sensory) alalia] // Zh. Nevrologii i Psikhiiatrii im. S.S. Korsakova. 2016. V. 16. № 11. P. 114.
5. *Бобылова М.Ю., Капустина А.А., Браудо Т.А. и др.* Моторная и сенсорная алалия: сложности диагностики // Русский журн. детской неврологии. 2017. Т. 12. № 4. С. 32.
Bobylova M.Yu., Kapustina A.A., Braudo T.A. et al. [Motor and sensory alalia: Diagnostic difficulties] // Russian J. Child Neurology. 2017. V. 12. № 4. P. 32.
6. *Визель Т.Г.* Об “импрессивном” безречии у детей (теоретический аспект с позиции нейропсихологии) / Психологические и психоаналитические исследования: Ежегодник 2018–2019. М.: НОЧУ ВО “Московский институт психоанализа”, 2020. С. 207.
Vizel T.G. [About “impressive” speechlessness in children (Theoretical aspect from neuropsychological point of view)] / Psychological and psychoanalytical research: 2018–2019 almanac. 2020. P. 207.
7. *Лукашевич И.П., Попова С.М., Шкловский В.М.* Роль поражения субкортикальных отделов мозга при формировании алалии // Физиология человека. 2011. Т. 37. № 5. С. 41.
Lukashevich I.P., Popova S.M., Shklovsky V.M. The role of damage to the cerebral subcortical divisions in the formation of alalia // Human Physiology. 2011. V. 37. № 5. P. 550.
8. *Prystauka Y., Lewis A.G.* The power of neural oscillations to inform sentence comprehension: a linguistic perspective // Lang Linguist. Compass. 2019. V. 13. № 9. P. e12347.
9. *Ortiz-Mantilla S., Roesler C.P., Realpe-Bonilla T. et al.* Modulation of Theta Phase Synchrony during Syllable Processing as a Function of Interactive Acoustic Experience in Infancy // Cereb. Cortex. 2022. V. 32. № 5. P. 919.
10. *Schneider J.M., Abel A.D., Momsen J. et al.* Neural oscillations reveal differences in the process of word learning among school-aged children from lower socioeconomic status backgrounds // Neurobiol. Lang (Camb). 2021. V. 2. № 3. P. 372.
11. *Wang L., Bastiaansen M.* Oscillatory brain dynamics associated with the automatic processing of emotion in words // Brain Lang. 2014. V. 137. P. 120.
12. *Saltuklaroglu T., Bowers A., Harkrider A.W. et al.* EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing // Brain Lang. 2018. V. 187. P. 41.
13. *You Y., Correas A., Jao Keehn R.J. et al.* MEG Theta during Lexico-Semantic and Executive Processing Is Altered in High-Functioning Adolescents with Autism // Cereb. Cortex. 2021. V. 31. № 2. P. 1116.
14. *Jiang Z., Waters A.C., Liu Y. et al.* Event-related theta oscillatory substrates for facilitation and interference effects of negative emotion on children’s cognition // Int. J. Psychophysiol. 2017. V. 116. P. 26.
15. *Maris E., Oostenveld R.* Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data // J. Neurosci. Methods. 2007. V. 164. № 1. P. 177.
16. *Maguire M.J., Schneider J.M., Melamed T.C. et al.* Temporal and topographical changes in theta power between middle childhood and adolescence during sentence comprehension // Dev. Cogn. Neurosci. 2022. V. 53. P. 101056.
17. *Schneider J.M., Abel A.D., Ogiela D.A. et al.* Developmental differences in the neural oscillations underlying auditory sentence processing in children and adults // Brain Lang. 2018. V. 186. P. 17.
18. *Vigneau M., Beaucousin V., Hervé P.-Y. et al.* What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? // NeuroImage. 2011. V. 54. № 1. P. 577.
19. *Walenski M., Europa E., Caplan D. et al.* Neural networks for sentence comprehension and production: An ALE-based meta-analysis of neuroimaging studies // Hum. Brain Mapping. 2019. V. 40. № 8. P. 2275.
20. *Knyazev G.G.* Motivation, emotion, and their inhibitory control mirrored in brain oscillations // Neurosci. Biobehav. Rev. 2007. V. 31. № 3. P. 377.
21. *Бочаров А.В., Савостьянов А.Н., Таможников С.С. и др.* ЭЭГ-корреляты имплицитного восприятия эмоциональной окраски предложений и личностных особенностей регуляции эмоций // Журн. высш. нерв. деят. им. И.П. Павлова. 2021. Т. 71. № 2. С. 270.
Bocharov A.V., Savostyanov A.N., Tamozhnikov S.S. et al. EEG [Correlations of implicit perception of sentences emotional coloring with strategies of reappraisal and suppression of emotions] // Zh. Vyssh. Nerv. Deyat. Im. I.P. Pavlova. 2021. V. 71. № 2. P. 270.
22. *Thornton D., Harkrider A.W., Jenson D., Saltuklaroglu T.* Sensorimotor activity measured via oscillations of EEG mu rhythms in speech and non-speech discrimination tasks with and without segmentation demands // Brain Lang. 2018. V. 187. P. 62.
23. *Arévalo A.L., Baldo J.V., Dronkers N.F.* What do brain lesions tell us about theories of embodied semantics and the human mirror neuron system? // Cortex. 2012. V. 48. № 2. P. 242.
24. *Fadiga L.* Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles: a TMS study // Eur. J. Neuroscience. 2002. V. 15. № 2. P. 399.
25. *Alho J., Sato M., Sams M. et al.* Enhanced early-latency electromagnetic activity in the left premotor cortex is associated with successful phonetic categorization // Neuroimage. 2012. V. 60. № 4. P. 1937.
26. *Liebenthal E., Möttönen R.* An interactive model of auditory-motor speech perception // Brain Lang. 2018. V. 187. P. 33.
27. *Smalle E.H., Rogers J., Mottonen R.* Dissociating Contributions of the Motor Cortex to Speech Perception and Response Bias by Using Transcranial Magnetic Stimulation // Cereb. Cortex. 2015. V. 25. № 10. P. 3690.

Words Listening Related Electroencephalography Spectrum Perturbations in Normally Developing Children and Sensory Alalia Children

M. A. Nacharova^{a, *}, D. V. Nacharov^b, V. B. Pavlenko^a

^a*Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russia*

^b*Sevastopol State University, Sevastopol, Russia*

^{*}*E-mail: alikina93@gmail.com*

The analysis of electroencephalography (EEG) event related spectrum perturbations in 23 normally developing and 23 sensory alalia children of age between 4 and 10 years old during listening to nouns is conducted. In EEG θ -frequency range of healthy children, synchronization was detected in the frontal, central, and temporal leads, and desynchronization was found in most leads in children with sensory alalia. Intergroup differences in the reactivity of the EEG θ -range reached the level of statistical significance in C_4 lead. In the α -range, EEG desynchronization was observed in typically developing children, and synchronization was observed in children with sensory alalia. Differences in the α -activity power reached the level of statistical significance in leads C_3 , F_3 , P_3 , O_1 . An EEG θ -band synchronization decrease during words listening in children with sensory alalia may reflect an impairment of retrieving words from memory and less emotional involvement in the speech perception process, while the absence of α -activity desynchronization in the central leads is a impairment of the functioning of sensorimotor neural networks, involved in the speech perception and generation. The revealed features of EEG reactivity are important for understanding the central speech perception mechanisms in normal children, as well as in children with disorders such as sensory alalia.

Keywords: speech, children, EEG, θ -activity, α -activity, sensory alalia.

ОЦЕНКА ЭМОЦИОНАЛЬНОЙ СФЕРЫ ДЕТЕЙ С ТИПИЧНЫМ РАЗВИТИЕМ И РАССТРОЙСТВАМИ АУТИСТИЧЕСКОГО СПЕКТРА НА ОСНОВАНИИ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ПОДХОДА

© 2023 г. О. В. Фролова¹, *, Е. А. Клешинев¹, А. С. Григорьев¹,
Ю. О. Филатова¹, Е. Е. Ляко¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: olchel@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 12.01.2023 г.

Принята к публикации 31.01.2023 г.

Цель исследования — изучение особенностей эмоциональной сферы детей с типичным развитием (ТР) и расстройствами аутистического спектра (РАС) с использованием разработанного междисциплинарного методического подхода. Методика включает два блока — информацию о развитии ребенка (опросники для родителей) и тестирование ребенка, содержащее задания, направленные на изучение отражения эмоционального состояния в характеристиках голоса, речи, мимике, поведении и распознавание детьми эмоциональных состояний по голосу и лицевой экспрессии. В исследовании приняли участие 70 детей: 50 с ТР и 20 с РАС. Осуществлена аудиозапись речи и видеозапись мимической экспрессии и поведения детей на протяжении тестирования. Получены нормативные данные — балльные оценки по опросникам и шкалам, результаты психофизиологического тестирования детей. Определены различия между ТР детьми и детьми с РАС по шкалам опросников: общая информация о развитии, оценка эмоциональной сферы, дополнительная серия вопросов о поведении ребенка; по баллам в тестовых заданиях на распознавание и отражение эмоций детьми. Проведенное исследование является первым шагом в разработке новых фундаментальных подходов к диагностике, реабилитации и обучению детей с атипичным развитием с использованием методов автоматического распознавания эмоциональных состояний детей по вокализациям, речи и мимике.

Ключевые слова: эмоциональное развитие, методический подход для оценки эмоционального развития, отражение и распознавание эмоционального состояния, расстройства аутистического спектра.

DOI: 10.31857/S0131164622600884, **EDN:** GAWMJG

Эмоции представляют собой особый вид психических процессов, отражающих состояние человека, его отношение к окружающему миру и самому себе. Эмоции проявляются в мимике, поведении, голосе и речи, физиологических изменениях, связанных с активацией вегетативной нервной системы. При нарушении развития и/или атипичном развитии ребенка любое из сложных звеньев, лежащих в основе регуляции эмоционального поведения, может быть нарушено. Это приводит к несоответствию внутреннего состояния и внешнего проявления эмоций [1].

Существуют различные подходы к оценке эмоциональной сферы детей с типичным (ТР) и атипичным развитием. Для ТР детей дошкольного возраста используют методы наблюдения за поведением ребенка в естественных условиях и при выполнении специальных заданий, опросники для родителей, проективные рисуночные те-

сты и проективные методики [2, 3], для детей старшего возраста применяют опросники [4]. Специальные тесты для оценки эмоционального развития детей немногочисленны и, как правило, адаптированы к определенному возрасту или особенностям развития. С точки зрения авторов систематического обзора [5] существующие методики в большей степени направлены на оценку социальных навыков, чем эмоционального развития. В данной работе приведены 12 методик оценки социальных и эмоциональных навыков детей и подростков и выделены те методики, которые используются достаточно часто — это “Шкала оценки социальных навыков и поведения” (SCBE); “Система повышения социальных навыков” (SSIS), “Анализ невербальной точности” (DANVA). DANVA [6] включает две шкалы: 1) оценки способности ребенка определять эмоциональное состояние по выражению лица, позе,

жестам и голосу, 2) оценки способности проявлять свое эмоциональное состояние в лицевой экспрессии, жестах, голосе. В модифицированной методике *DANVA-2* предлагается стандартный стимульный материал — изображения лицевой экспрессии четырех эмоций — радость, печаль, гнев и страх, разной степени выраженности [7]. Апробация большинства методик проведена на выборке детей, проживающих в США и Великобритании, что не позволяет использовать их без предварительной адаптации для оценки эмоционального развития детей, растущих в другой языковой и культурной среде.

В литературе подробно описаны особенности развития эмоциональной сферы у детей с расстройствами аутистического спектра (РАС) [8–12]. В работе [13] рассмотрены механизмы, лежащие в основе нарушений эмоциональной регуляции у людей с РАС, приводятся данные исследований, основанных на современных методах нейровизуализации (функциональная магнитно-резонансная томография — фМРТ), обсуждается роль медиальной префронтальной коры и миндалевидного тела. Авторы отмечают, что для исследования эмоциональной регуляции и выделения специфических особенностей эмоциональной сферы молодых людей с РАС, по сравнению с пациентами с другими нарушениями, необходим мультидисциплинарный подход, в котором физиологические методики (фМРТ, оценка частоты сердечных сокращений (ЧСС)) сочетались бы с методами оценки поведения, отчетами родителей и самоотчетами.

В настоящее время для оценки уровня эмоциональной регуляции детей с РАС используют методы [12]: наблюдения и кодирования поведения (в ситуациях, направленных на вызов эмоционального поведения — например, невозможность получить желаемую игрушку), мониторинг физиологических параметров (ЧСС), опросники (можно применять для детей с РАС с высоким интеллектом), опросники для родителей [14, 15]. Для детей с высокофункциональным аутизмом применяют методики, апробированные на ТР детях, например, [16]. Для детей с РАС, которые сопровождаются интеллектуальными нарушениями, стандартизированные инструменты оценки эмоционального развития единичны. Например, “Шкала эмоционального развития” *SED-S* апробирована на выборке голландских и шведских детей 3–18 лет с интеллектуальными нарушениями разной степени тяжести — от глубокой до легкой, часть детей в данном исследовании имели РАС [17]. Показано, что эмоциональное развитие детей с РАС ниже, чем у детей без РАС с тем же уровнем интеллекта [17].

Для детей с типичным и атипичным развитием (включая РАС и синдром Дауна), воспитываю-

щихся в русскоязычной среде, разработан комплексный стандартизированный междисциплинарный подход к анализу развития эмоциональной сферы, с использованием батареи тестов, опросников, аудио и видео стимульного материала разной степени сложности, психофизиологического тестирования — методика “*Child Emotion Development Method*” (*CEDM*) [18]. Предпосылкой для создания *CEDM* послужили методологические подходы, предполагающие оценку вовлеченности в формирование эмоций разных уровней организации нервной системы — вегетативного, лимбического, кортикального [19]. *CEDM* позволяет уменьшить фактор субъективности и предоставляет полноценную информацию для оценки способности детей к отражению эмоционального состояния в голосе, речи, мимике и поведении, и распознавания эмоциональных состояний других людей по голосу, мимике и телодвижениям, позволяет получить речевой материал ребенка и видео мимической экспрессии ребенка в разных эмоциональных состояниях и при выполнении тестовых заданий.

Цель данного исследования — изучение особенностей эмоциональной сферы детей с типичным развитием и расстройствами аутистического спектра с использованием *CEDM*.

Задачи исследования: 1) апробация методического подхода *CEDM* на выборке ТР детей; 2) тестирование детей с РАС по методике *CEDM* и сравнительный анализ результатов тестирования детей с РАС и ТР.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 50 ТР детей 5–16 лет (25 мальчиков и 25 девочек) и 20 детей с РАС (15 мальчиков, 5 девочек). Критерием для включения детей с ТР в исследования было отсутствие клинических проблем с психическим здоровьем, отсутствие серьезных нарушений зрения и слуха. Критерии для включения в исследование детей с РАС: 1) Подтвержденный диагноз РАС в соответствии с *DSM – V* (*DSM – V*, 2013). 2) Баллы по шкале *CARS* [20] — 30–43 балла (легкая и умеренная степень тяжести расстройств). 3) Отсутствие серьезных нарушений зрения и слуха, согласно заключениям специалистов. 4) Уровень речевого развития детей предполагал возможность использования ими простых слов и фраз.

Процедура исследования. Исследование проводили в условиях лаборатории по “Методике оценки эмоционального развития детей” *CEDM* [18]. Методика включает два блока: 1) информацию о развитии ребенка (опросники для родителей); 2) тестирование ребенка, содержащее задания, направленные на изучение отражения эмоционального состояния в характеристиках голоса, речи,

мимике, поведении и распознавание детьми эмоциональных состояний других людей по голосу и лицевой экспрессии.

В рамках *первого блока методики* родители детей с РАС заполняли опросник *CARS*, родители всех детей — опросник “Общее и эмоциональное развитие ребенка” [18]. Данный опросник включает разделы-шкалы: 1) Информация о протекании беременности (вопросы о здоровье матери, осложнениях, сроке гестации, продолжительности и особенностях протекания родов). 2) Общая информация о развитии ребенка (баллы по шкале Апгар, вес, рост ребенка, возраст, в котором ребенок осваивал различные навыки, заболевания в раннем возрасте). 3) Оценка эмоциональной сферы ребенка (разнообразие, адекватность эмоциональных проявлений). 4) Дополнительная серия вопросов о поведении ребенка (страхи, особенности поведения, чрезмерные эмоциональные реакции). 5) Информация о семье (полная/неполная, возраст, уровень образования родителей, наличие других детей в семье).

Второй блок методики — тестирование ребенка включал тестовые задания для изучения особенностей проявления и распознавания эмоций ребенком. Для исследования *отражения* эмоций в речи, поведении и мимике детей использовали следующие задания: 1) Беседа ребенка и экспериментатора со стандартным набором вопросов. 2) Игра со стандартным набором игрушек (для детей от 5 до 7 лет). 3) Ролевая игра. 4) “Актерская” игра — ребенок должен изобразить различные эмоциональные состояния в мимике и в голосе при чтении/повторении за экспериментатором специально подобранного речевого материала — слов, фраз и текстов-бессмыслиц. 5) Рисунок эмоционального лица — ребенка просят изобразить эмоции с использованием заготовки “лицо”. 6) Интервью, включавшее вопросы о том, какие эмоции знает ребенок, как он может охарактеризовать ту или иную эмоцию. 7) “Цветовой тест Люшера” [18].

Для исследования *восприятия* (распознавания) эмоций других людей предлагали задания: 1) Видеотесты — ребенка просили определить эмоциональное состояние по статическим изображениям (фотографиям) лиц детей (тест 1) и взрослых (тест 2), демонстрирующих базовые эмоции. 2) Тест “Чтение мыслей по глазам” (“*Reading the Mind in the Eyes*” Test) [21] — ребенку предлагали определить гнев и радость по изображениям глаз ребенка в соответствующих эмоциональных состояниях; дополнительно ребенка спрашивали, имеет ли для него значение организация тестового материала: проще распознать эмоцию при предъявлении одного изображения или выбрать определенную эмоцию из нескольких изображений (стратегия распознавания эмоционального

состояния). 3) Рассказ по картинкам — ребенок должен составить рассказ по серии картинок “Сказка о львенке”. 4) Мультфильм — ребенку предлагали посмотреть 5-минутный мультфильм и описать эмоции главных действующих лиц на основании задаваемых вопросов. 5) Аудиотест — ребенок определял эмоциональное состояние при прослушивании аудиотеста — речи детей, демонстрирующих базовые эмоции при чтении текстов-бессмыслиц [18].

Методика включала оценку физиологических и психофизиологических параметров. Осуществляли проверку слуха ребенка методом тональной аудиометрии. Проводили проверку фонематического слуха путем предъявления пар и троек слогов, используемых в логопедической практике. Посредством дихотического тестирования определяли “ведущее полушарие по речи”, считали коэффициент латерального предпочтения — КЛП [22]. Оценка ЧСС ребенка осуществляли для контроля его эмоционального состояния на протяжении тестирования с использованием пульсоксиметра.

Тестирование ребенка осуществляли два экспериментатора с опытом работы с детьми с атипичным развитием. Перед началом исследования детей и родителей кратко информировали о ходе тестирования, заданиях. Детям давали инструкции, согласно которым просили вести себя как можно более естественно. По желанию ребенка исследование могло быть прекращено. Одна сессия длилась 1–1.5 ч. В это время входила беседа с родителями, заполнение опросников и тестирование детей (40–60 мин). Детей с РАС тестировали в присутствии родителей.

Исследование начинали с короткой беседы с ребенком, экспериментатор задавал ребенку стандартный набор вопросов. Затем ребенку последовательно предъявляли батарею тестов. Если ребенок молчал и отказывался выполнять задание, экспериментатор предлагал ему следующее задание. После тестирования проводили аудиометрию, фонематическое и дихотическое тестирование.

Обработка данных. Осуществляли балльную оценку данных опросников для родителей, тестовых заданий — по шкалам “Восприятие эмоций” (ВЭ) и “Отражение эмоций” (ОЭ), анализировали результаты психофизиологического тестирования. Баллы по шкале ВЭ выставляли по сумме баллов для заданий: 1) Видеотест-1. 2) Видеотест-2. 3) Тест “Чтение мыслей по глазам” (с учетом стратегии, используемой ребенком). 4) Рассказ по картинкам. 5) Мультфильм. 6) Аудиотест. Баллы по шкале ОЭ — по сумме баллов для заданий: 1) Беседа с экспериментатором. 2) Игра с набором игрушек. 3) Ролевая игра. 4) “Актерская” игра — мимическая экспрессия. 5) “Актерская” игра —

Таблица 1. Сумма баллов по шкалам *CEDM* для детей с типичным развитием (ТР)

Опросники для родителей			
№	шкала	диапазон	среднее значение $\pm$ стандартное отклонение
1	Беременность	8–13	9.6 ± 1.4
2	Развитие ребенка	22–39	26.8 ± 3.4
3	Поведение ребенка	13–20	15.2 ± 2.0
4	Эмоциональная сфера	19–28	21.4 ± 2.0
Тестовые задания			
1	Отражение эмоций (ОЭ)	30–53	40.4 ± 4.2
2	Восприятие эмоций (ВЭ)	29–48	40.6 ± 4.4

проявление эмоций в голосе. 6) Рисунок эмоционального лица. 7) Интервью. 8) “Цветовой тест Люшера”.

Результаты опросников для родителей оценивали следующим образом: чем выше баллы по шкалам, тем хуже показатели, характеризующие течение беременности, развитие, поведение и эмоциональную сферу ребенка. При тестировании детей — чем лучше ребенок выполнял задания, тем выше баллы он получал. Оценку выполнения ребенком тестовых заданий осуществляли путем просмотра видеозаписей двумя независимыми экспертами (специалистами с опытом работы с детьми с нарушениями развития). При совпадении мнений экспертов выставляли соответствующий балл, при несоответствии — видеоматериал просматривали совместно и принимали единое решение. Балльную оценку по шкале Лайкерта “1 — нет, 2 — слабо, 3 — умеренно, 4 — хорошо” ставили за каждое задание, выполненное ребенком, далее баллы за задания суммировали. Пример балльной оценки тестовой ситуации беседа с ребенком. Оценивали ответы ребенка на вопросы: 1 — не обращает внимание на экспериментатора, не отвечает ни на один из вопросов; 2 — ответы одним словом на 1–5 вопросов; 3 — отвечает на не менее 10 вопросов, использует краткие и/или подробные ответы; 4 — отвечает на все/в основном на все вопросы, ответы краткие и/или подробные. Для заданий по распознаванию эмоциональных состояний учитывали количество правильных ответов ребенка в каждом тесте.

Во время тестирования производили запись речи детей с использованием магнитофона “Marantz PMD660” с выносным микрофоном “SENNHEISER e835S” (режим моно). Для ситуаций интервью, описания картинок, проявления эмоций в голосе расстояние от лица ребенка до микрофона не превышало 50 см (30–50 см). Для игровой ситуации расстояние от лица ребенка до микрофона варьировалось от 30 до 100 см. Параллельно

осуществляли видеозапись поведения и мимической экспрессии ребенка с помощью видеокамеры “SONY HDR-CX560” (максимальное разрешение 1920×1080 при частоте 50 кадров в секунду), которая располагалась на расстоянии 1 м от лица ребенка.

Все дети были протестированы один раз. Апробацию методики *CEDM* в данном исследовании выполняли на 50 ТР детях. Для сопоставления данных по детям с типичным и атипичным развитием (РАС, $n = 20$, возраст 9.6 ± 3 лет) была отобрана группа ТР детей, соответствующего возраста ($n = 20$ детей, возраст 9.9 ± 3.4 лет). Сравнение проводили только по тем тестам и заданиям, которые были выполнены детьми обеих групп.

Статистический анализ осуществляли с помощью программы “STATISTICA-10”. Использовали непараметрические критерии — корреляция Спирмена ($p < 0.05$), критерий Манна–Уитни, регрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Апробация методики CEDM — данные для ТР детей. ТР дети выполнили все предложенные задания. Баллы, полученные при обработке разделов опросника для родителей ТР детей и баллы по шкалам ОЭ и ВЭ для ТР детей представлены в табл. 1. Средние баллы, полученные ТР детьми для каждого тестового задания по шкалам ОЭ и ВЭ, представлены на рис. 1.

Все ТР дети имели нормальный слух (пороги слуха не выше 25 дБ по результатам аудиометрии). Результаты дихотического тестирования показали, что левое полушарие является ведущим при восприятии речи (ведущее правое ухо в дихотическом тестировании) у 62% ТР детей — значения КЛП больше 10%. У 22% детей не выявлено ведущего полушария в дихотическом тестировании (значения КЛП в диапазоне от -10 до $+10\%$), у 16% детей — правое полушарие является ведущим при восприятии речи (КЛП менее -10%).

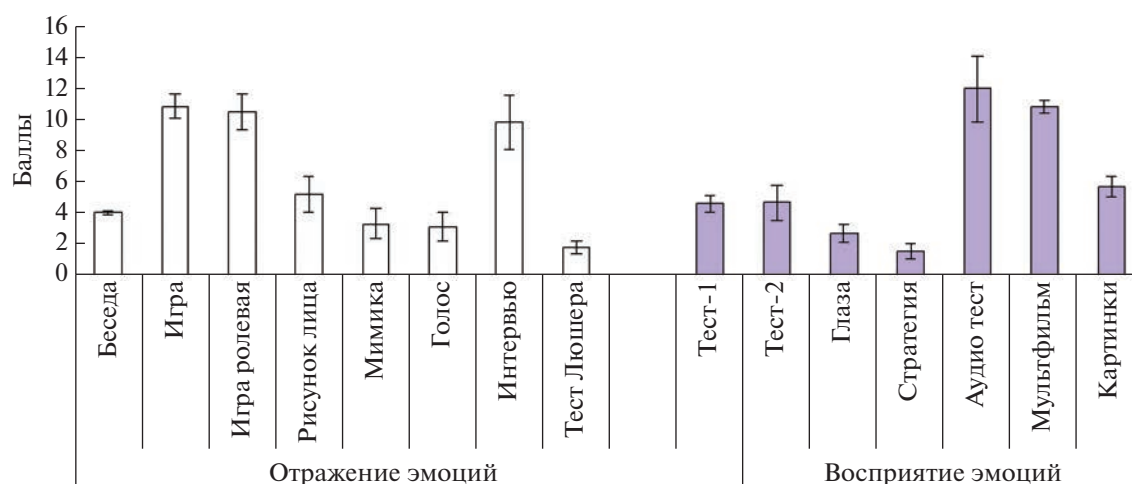


Рис. 1. Баллы по тестовым заданиям — шкалы “Отражение эмоций” и “Восприятие эмоций”.

По горизонтальной оси — тестовые задания, по вертикальной оси — баллы, полученные детьми с типичным развитием (ТР), средние значения и стандартные отклонения.

При проверке фонематического слуха ТР дети были способны правильно повторить $89 \pm \pm 16\%$ тестового материала (пар и троек слогов).

На основании регрессионного анализа (табл. 2) показано, что возраст ТР детей является предиктором баллов по шкалам ОЭ и ВЭ, баллов по отдельным заданиям — рисунок эмоционального лица, интервью, распознавание эмоций по аудиотесту, рассказ по картинкам.

С возрастом детей увеличивается количество правильных ответов при проверке фонематического слуха (степень сформированности фонематического слуха) $F(1,48) = 11.84$ $p < 0.01$ ($R^2 = 0.2$ $\beta = 0.45$). Степень сформированности фонематического слуха связана с баллами по тестовым заданиям (табл. 3).

Значения КЛП связаны с баллами по отдельным тестовым заданиям: 1) Интервью $F(1,48) = 10.57$ $p < 0.01$ ($R^2 = 0.18$ $\beta = -0.43$) — дети с низкими и отрицательными значениями КЛП лучше отвечают на вопросы про эмоциональные состоя-

ния, чем дети с высокими значениями КЛП. 2) Стратегия при распознавании эмоционального состояния по глазам $F(1,48) = 5.56$ $p < 0.05$ ($R^2 = 0.1$ $\beta = 0.32$) — дети с высокими значениями КЛП чаще отмечают, что для них не имеет значения стратегия распознавания эмоционального состояния.

Данные регрессионного анализа подтверждены корреляционным анализом (корреляция Спирмена, $p < 0.05$).

2. Сравнительный анализ эмоциональной сферы детей с ТР и РАС с использованием методики CEDM. Дети с РАС в рамках одной сессии были способны выполнить только часть заданий: 1) Беседа ребенка и экспериментатора. 2) Игра с игрушками. 3) Ролевая игра. 4) Составление рассказа по картинкам. 5) Видеотест-1 (определение базовых эмоций по фотографиям детей). Для детей с РАС была осуществлена проверка фонематического слуха и дихотическое тестирование. Соответственно, сравнительный анализ детей с ТР и РАС проведен только по части тестовых заданий, вы-

Таблица 2. Связь между возрастом детей с типичным развитием (ТР) и баллами по тестовым заданиям — регрессионный анализ

Возраст ребенка				
№	тестовое задание	p	R^2	β
1	Отражение эмоций $F(1,48) = 16.28$	0.001	0.25	0.5
1.1	Рисунок лица $F(1,48) = 22.58$	0.001	0.32	0.57
1.2	Интервью $F(1,48) = 80.44$	0.001	0.63	0.79
2	Восприятие эмоций $F(1,48) = 13.12$	0.001	0.22	0.46
2.1	Рассказ по картинкам $F(1,48) = 6.11$	0.05	0.11	0.34
2.2	Аудиотест $F(1,48) = 19.27$	0.001	0.29	0.54

Таблица 3. Связь между сформированностью фонематического слуха детей с типичным развитием (ТР) и баллами по тестовым заданиям – регрессионный анализ

Возраст ребенка				
№	тестовое задание	p	R^2	β
1	Отражение эмоций $F(1,48) = 11.44$	0.01	0.19	0.44
1.1	Рисунок лица $F(1,48) = 19.4$	0.001	0.29	0.54
1.2	Интервью $F(1,48) = 13.71$	0.001	0.22	0.47
2	Восприятие эмоций $F(1,48) = 9.35$	0.01	0.16	0.4
2.1	Аудиотест $F(1,48) = 11.6$	0.01	0.2	0.44

полненных детьми обеих групп. Сравнение данных опросников проведено по вопросам, ответы на которые дали родители всех детей.

По баллам шкалы опросника, характеризующей протекание беременности, не выявлено различий между детьми с РАС и ТР (рис. 2, А). Баллы по шкалам опросника “Общая информация о развитии ребенка”, “Дополнительная серия вопросов о поведении ребенка”, “Оценка эмоциональной сферы ребенка” в группе ТР детей ниже, чем в группе детей с РАС (рис. 2, А), т.е. развитие ТР детей лучше, чем детей с РАС. Баллы детей с РАС по шкалам ОЭ и ВЭ (при выполнении тестовых заданий) ниже, чем у ТР детей (рис. 2, Б).

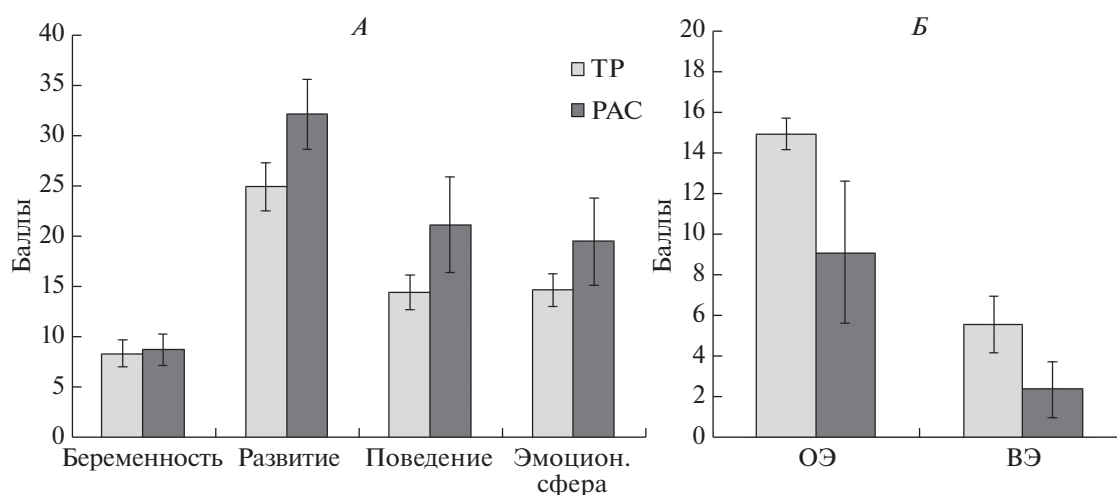
На основании регрессионного анализа выявлена связь между группой детей (ТР/РАС) и баллами по шкалам опросника, характеризующим развитие ребенка, его поведение и эмоциональную сферу, баллами по шкалам ОЭ и ВЭ (табл. 4).

Согласно результатам дихотического тестирования, у большинства детей с РАС доминирует левое полушарие, правое полушарие является ве-

дущим у 7% детей с РАС. 20% детей с РАС были не способны пройти дихотическое тестирование. При проверке фонематического слуха дети с РАС правильно повторяли $55 \pm 29\%$ тестового материала (от 0 до 100% правильных ответов).

Для детей с РАС выявлена связь между показателями: 1) Баллы по шкале *CARS* и баллы, полученные при выполнении задания “Беседа с экспериментатором” $F(1,17) = 4.6$ $p < 0.05$ ($R^2 = 0.21$ $\beta = -0.46$); 2) Баллы по шкале опросника “Оценка эмоциональной сферы ребенка” и баллы по шкале ОЭ $F(1,18) = 9.24$ $p < 0.01$ ($R^2 = 0.34$ $\beta = -0.58$).

Для детей двух групп (ТР + РАС) показано: 1) Коэффициент латерального предпочтения при дихотическом тестировании связан с разнообразием эмоций у ребенка (по данным опросника для родителей) $F(1,33) = 4.49$ $p < 0.05$ ($R^2 = 0.12$ $\beta = -0.35$). 2) Баллы по шкале опросника “Оценка эмоциональной сферы ребенка” связаны с баллами по шкале ОЭ $F(1,38) = 43.49$ $p < 0.001$ ($R^2 = 0.53$).

**Рис. 2.** Баллы по шкалам *CEDM* для детей с типичным развитием (ТР) и расстройствами аутистического спектра (РАС).

А – опросник для родителей, Б – тестовые задания. По горизонтальной оси – шкалы, по вертикальной оси – баллы, средние значения и стандартные отклонения.

Таблица 4. Связь между группой детей и баллами по шкалам методики *CEDM* – регрессионный анализ

Опросник				
№	шкала	p	R^2	β
1	Развитие ребенка $F(1,38) = 56.71$	0.01	0.6	0.77
2	Поведение ребенка $F(1,23) = 28.326$	0.001	0.55	0.74
3	Эмоциональная сфера $F(1,25) = 21.5$	0.001	0.36	0.6
Тестовые задания				
1	Отражение эмоций $F(1,38) = 52.32$	0.001	0.58	–0.76
2	Восприятие эмоций $F(1,37) = 52.49$	0.001	0.59	–0.77

$\beta = -0.73$) и ВЭ $F(1,37) = 20.72$ $p < 0.001$ ($R^2 = 0.36$ $\beta = -0.6$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Показана возможность применения разработанного междисциплинарного подхода *CEDM* для изучения особенностей эмоциональной сферы детей с типичным развитием и расстройствами аутистического спектра. *CEDM* включает совокупность методик, апробированных в ходе ряда исследований [21, 23, 24], используемых с учетом возраста детей и особенностей их развития, дополненных оригинальными методиками – опросник “Общее и эмоциональное развитие ребенка”, задания, позволяющие ребенку продемонстрировать эмоции в голосе и речи [25], аудиотест.

На выборке 50 детей с ТР показан диапазон и средние значения балльных оценок по каждой шкале, прослежена динамика показателей ТР детей с возрастом ребенка: увеличиваются баллы по шкалам ОЭ и ВЭ, баллы по отдельным заданиям – интервью, рисунок эмоционального лица, распознавание эмоций по аудиотесту, рассказ по картинкам. В целом, эти данные согласуются с представлениями об улучшении с возрастом способности распознавания эмоций ТР детьми по голосу [26, 27] и лицевой экспрессии [28, 29]. В работе выявлена связь между психофизиологическими показателями и баллами по шкалам опросника. Сформированность фонематического слуха связана с баллами по шкалам ОЭ и ВЭ. Значения коэффициента латерального предпочтения – с баллами по отдельным тестовым заданиям – интервью и распознавание эмоций по глазам.

Сравнение детей с ТР и РАС позволило показать различия между группами детей по данным опросника для родителей – шкалам “Общая информация о развитии ребенка”, “Дополнительная серия вопросов о поведении ребенка”, “Оценка эмоциональной сферы ребенка”. Сравнение детей с РАС и ТР на основании выполнения тестовых заданий (учитывали только задания, выполненные детьми обеих групп) показало,

что по шкалам “Отражение эмоций” и “Восприятие эмоций” баллы детей с РАС ниже, чем баллы ТР детей. При этом баллы детей с РАС, полученные при выполнении тестового задания “Беседа с экспериментатором” (включенного в шкалу “Отражение эмоций”), связаны с баллами по шкале *CARS*. В целом, результаты исследования согласуются с данными о том, что дети с РАС проявляют и распознают эмоции хуже, чем ТР дети [1, 30], на распознавание эмоций людьми с РАС влияет уровень их интеллектуального развития [30].

В работе [30] авторы отмечают, что различия между людьми с РАС и ТР в проявлении эмоций в лицевой экспрессии более значимы, чем при распознавании эмоций по лицевой экспрессии. На степень проявления эмоций детьми с РАС влияет контекст: при естественном социальном взаимодействии дети с РАС менее интенсивно демонстрируют эмоции, чем ТР дети, однако при имитации эмоциональных стимулов различия между детьми с ТР и РАС проявляются не так явно. Согласно нашим результатам, баллы по шкале опросника для родителей “Оценка эмоциональной сферы ребенка” у детей с РАС связаны с баллами по тестовым заданиям на отражение эмоций, но не восприятие эмоций. Это косвенно может свидетельствовать о том, что при оценке эмоциональной сферы своих детей родители придают больше значения отражению эмоций, но не особенностям восприятия.

Проведенное исследование позволило заключить, что одной сессии тестирования недостаточно для детей с РАС. Тестирование в несколько сеансов возможно при проведении научных исследований, но в дальнейшем (после апробации методики на большей выборке детей) для решения практических задач представляется необходимым создание укороченной версии шкалы *CEDM* для детей с атипичным развитием, например, как в работе [31]. Небольшая выборка не позволяет на данном этапе разделить балльные оценки по шкалам в соответствии с возрастом детей.

Используемый методический подход предполагает создание базы данных видеозаписей пове-

дения и аудиозапись эмоциональной речи детей с типичным и атипичным развитием в стандартизированных условиях [32, 33]. Видеозаписи эмоциональной мимики ТР детей и детей с РАС, аудиозаписи голоса и речи будут использованы для автоматического анализа эмоционального состояния по детской речи. Машинные методы распознавания эмоционального состояния детей по характеристикам голоса, речи, лицевой экспрессии разрабатываются в настоящее время для детей, воспитывающихся в различных языковых и культурных средах [33–35]. Обсуждается возможность применения автоматических систем распознавания эмоций в специальных компьютерных приложениях обучения детей с типичным развитием и РАС [36, 37]. Возможность автоматического распознавания эмоционального состояния по речи русскоязычных детей показана в наших предшествующих исследованиях [38]. Таким образом, проведенное исследование является первым шагом в разработке новых фундаментальных подходов к диагностике и в дальнейшем для реабилитации и обучения детей с атипичным развитием с использованием методов автоматического распознавания эмоциональных состояний детей по вокализациям, речи и мимике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена апробация комплексного междисциплинарного подхода к анализу развития эмоциональной сферы детей (методика *CEDM*) на 50 типично развивающихся детях, воспитывающихся в условиях русскоязычной среды. Получены нормативные данные — балльные оценки по опросникам и шкалам методики, результаты психофизиологического тестирования детей. Выявлена возрастная динамика показателей, характеризующих эмоциональное развитие детей с типичным развитием. Определены различия между детьми с типичным развитием и расстройствами аутистического спектра по шкалам опросника для родителей: “Общая информация о развитии ребенка”, “Оценка эмоциональной сферы ребенка”, “Дополнительная серия вопросов о поведении ребенка”; по баллам в тестовых заданиях на отражение и восприятие эмоций детьми. Определены перспективы практического использования данных, полученных в результате использования методики *CEDM*.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Родители всех детей представили письменное информированное

согласие, подписанное ими после разъяснения им потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 22-45-02007).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Обоснование концепции исследования — Е.Е. Ляксо, О.В. Фролова, Ю.О. Филатова. Планирование исследования — Е.Е. Ляксо, О.В. Фролова, А.С. Григорьев. Методология — Е.Е. Ляксо, О.В. Фролова, Ю.О. Филатова. Проведение исследования, анализ данных, написание статьи — Е.Е. Ляксо, О.В. Фролова, Е.А. Клешнев, Ю.О. Филатова, А.С. Григорьев.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fridenson—Hayo Sh., Berggren S., Lassalle A. et al. Basic and complex emotion recognition in children with autism: cross-cultural findings // *Mol. Autism*. 2016. V. 7. № 1. P. 52.
2. Велюева С.В. Диагностика психических состояний детей дошкольного возраста: учебно-методическое пособие. СПб.: Речь, 2005. 240 с.
3. Денисова Н.Д. Диагностика эмоционального и личностного развития детей дошкольного возраста 3–7 лет. Волгоград: Учитель, 2020. 202 с.
4. Прихожан А.М. Диагностика личностного развития детей подросткового возраста. М.: АНО “ПЭБ”, 2007. 56 с.
5. Humphrey N., Kalamhouka A., Wigelsworth M. et al. Measures of Social and Emotional Skills for Children and Young People: A Systematic Review // *Educ. Psychol. Meas.* 2011. V. 71. № 4. P. 617.
6. Nowicki S., Duke M.P. Individual differences in the nonverbal communication of affect: The diagnostic analysis of nonverbal accuracy scale // *J. Nonverbal Behav.* 1994. V. 18. № 1. P. 9.
7. Nowicki S., Jr., Carton J. Measuring emotional intensity from facial expressions // *J. Soc. Psychol.* 1993. V. 133. № 5. P. 749.
8. Лебединский В.В. Нарушения психического развития в детском возрасте: Учеб. пособие для студ. психол. фак. высш. учеб. заведений. М.: Издательство Московского университета, 2003. 144 с.
9. Никольская О.С., Баенская Е.Р., Либлинг М.М. и др. Дети и подростки с аутизмом. Психологическое сопровождение. М.: Теревинф, 2005. 224 с.
10. Samson A.C., Hardan A.Y., Podell R.W. et al. Emotion regulation in children and adolescents with autism spectrum disorder // *Autism Res.* 2015. V. 8. № 1. P. 9.
11. Nuske H.J., Hedley D., Woollacott A. et al. Developmental delays in emotion regulation strategies in pre-

- schoolers with autism // *Autism Res.* 2017. V. 10. № 11. P. 1808.
12. Beck K.B., Conner C.M., Breitenfeldt K.E. et al. Assessment and treatment of emotion regulation impairment in autism spectrum disorder across the life span: Current state of the science and future directions // *Child Adolesc. Psychiatr. Clin. N. Am.* 2020. V. 29. № 3. P. 527.
 13. Mazefsky C.A., Herrington J., Siegel M. et al. The role of emotion regulation in autism spectrum disorder // *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry.* 2013. V. 52. № 7. P. 679.
 14. Samson A.C., Phillips J.M., Parker K.J. et al. Emotion dysregulation and the core features of autism spectrum disorder // *J. Autism Dev. Disord.* 2014. V. 44. № 7. P. 1766.
 15. Achenbach T.M., Ruffle T.M. The Child Behavior Checklist and related forms for assessing behavioral/emotional problems and competencies // *Pediatr. Rev.* 2000. V. 21. № 8. P. 265.
 16. Booth A.J., Rodgers J.D., Volker M.A. et al. Psychometric Characteristics of the DANVA-2 in High-Functioning Children with ASD // *J. Autism Dev. Disord.* 2019. V. 49. № 10. P. 4147.
 17. Sterkenburg P.S., Kempelmann G.E.M., Hentrich J. et al. Scale of emotional development-short: Reliability and validity in two samples of children with an intellectual disability // *Res. Dev. Disabil.* 2021. V. 108. 103821.
 18. Lyakso E., Frolova O., Kleshnev E. et al. Approbation of the Child's Emotional Development Method (CEDM) / Companion Publication of the 2022 International Conference on Multimodal Interaction (ICMI'22 Companion). New York, NY, USA, 2022. P. 201.
 19. Hart S. Psychometric properties of the Emotional Development Scale: investigating reliability and validity including corrections with the Marschak interaction method and the neuroaffective mentalizing interview. Ph. D. Thesis, Aalborg, Denmark: Aalborg University, 2018. 195 p.
 20. Schopler E., Reichler R.J., DeVellis R.F., Daly K. Toward objective classification of childhood autism: Childhood Autism Rating Scale (CARS) // *J. Autism Dev. Disord.* 1980. V. 10. № 1. P. 91.
 21. Baron-Cohen S., Wheelwright S., Hill J. et al. The "Reading the Mind in the Eyes" Test revised version: A study with normal adults, and adults with Asperger syndrome or high-functioning autism // *J. Child Psychol. Psychiatry.* 2001. V. 42. № 2. P. 241.
 22. Lyakso E., Frolova O. 2020 Early development indicators predict speech features of autistic children / Companion Publication of the 2020 International Conference on Multimodal Interaction (ICMI'20 Companion). October 25–29, 2020. Virtual event, Netherlands, 2020. P. 514.
 23. Hart S., Jacobsen S.L. Zones of proximal emotional development – psychotherapy within a neuroaffective perspective // *J. Infant Child Adolesc. Psychother.* 2018. V. 17. № 1. P. 28.
 24. Hart S., Jacobsen S.L. The Emotional Development Scale: Assessing the emotional capacity of 4–12 year olds // *J. Infant Child Adolesc. Psychother.* 2019. V. 18. № 2. P. 185.
 25. Lyakso E., Frolova O., Ruban N., Mekala A.M. Child's emotional speech classification by human across two languages: Russian & Tamil // *LNAI.* 2021. V. 12997. P. 384.
 26. Amorim M., Anikin A., Mendes A.J. et al. Changes in vocal emotion recognition across the life span // *Emotion.* 2021. V. 21. № 2. P. 315.
 27. Morningstar M., Nelson E.E., Dirks M.A. Maturation of vocal emotion recognition: Insights from the developmental and neuroimaging literature // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2018. V. 90. P. 221.
 28. Herba C.M., Landau S., Russell T. et al. The development of emotion-processing in children: effects of age, emotion, and intensity // *J. Child Psychol. Psychiatry.* 2006. V. 47. № 11. P. 1098.
 29. Kovarski K., Charpentier J., Houy-Durand E. et al. Emotional expression visual mismatch negativity in children // *Dev. Psychobiol.* 2022. V. 64. № 7. e22326.
 30. Keating C.T., Cook J.L. Facial expression production and recognition in autism spectrum disorders: A shifting landscape // *Child Adolesc. Psychiatr. Clin. N. Am.* 2020. V. 29. № 3. P. 557.
 31. Sappok T., Barrett B.F., Vandeveld S. et al. Scale of emotional development – Short // *Res. Dev. Disabil.* 2016. V. 59. P. 166.
 32. Lyakso E., Frolova O., Kaliyev A. et al. AD-Child.Ru: Speech Corpus for Russian children with atypical development // *LNAI.* V. 11658. P. 299.
 33. Pérez–Espinosa H., Martínez–Miranda J., Espinosa–Curiel I. et al. IESC-Child: An Interactive Emotional Children's Speech Corpus // *Comput. Speech Lang.* 2020. V. 59. P. 55.
 34. Cao G., Tang Y., Sheng J., Cao W. Emotion recognition from children speech signals using attention based time series deep learning / *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM).* 18–21 November 2019. San Diego, CA, USA, 2019. P. 1296.
 35. Landowska A., Karpus A., Zawadzka T. et al. Automatic emotion recognition in children with autism: A systematic literature review // *Sensors (Basel).* 2022. V. 22. № 4. 1649.
 36. Garcia-Garcia J.M., Penichet V.M.R., Lozano M.D., Fernando A. Using emotion recognition technologies to teach children with autism spectrum disorder how to identify and express emotions // *Univ. Access. Inf. Soc.* 2022. V. 21. P. 809.
 37. Guran A.M., Cojocar G.S., Diosan L.S. The next generation of edutainment applications for young children – A Proposal // *Mathematics.* 2022. V. 10. P. 645.
 38. Matveev Y., Matveev A., Frolova O. et al. Automatic speech emotion recognition of younger school age children // *Mathematics.* 2022. V. 10. № 14. P. 2373.

Assessment of the Emotional Sphere of Children with Typical Development and Autism Spectrum Disorders Based on an Interdisciplinary Approach

O. V. Frolova^{a, *}, E. A. Kleshnev^a, A. S. Grigorev^a, Yu. O. Filatova^a, E. E. Lyakso^a

^aSaint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

**E-mail: olchel@yandex.ru*

The aim of the study is to reveal the features of the emotional sphere of children with typical development (TD) and autism spectrum disorders (ASD) using the developed interdisciplinary methodological approach. The methodology includes two blocks – information about the development of the child (questionnaires for parents) and testing the child, containing tasks aimed at studying the manifestation of the emotional state in the characteristics of voice, speech, facial expressions, behavior and recognition by children of the emotional states of other people by voice and facial expression. The participants of the study were 70 children: 50 with TD and 20 with ASD. An audio and video recording of the speech, facial expressions and behavior of children during testing was made. Normative data were obtained – scores on questionnaires and scales, the results of psychophysiological testing of children. Differences between children with TD and ASD were determined according to the scales of the questionnaires: general information about development, the emotional sphere, additional information about child's behavior; by scores in the test tasks for recognition and manifestation of emotions by children. The conducted study is the first step in the development of new fundamental approaches to the diagnosis, rehabilitation and education of children with atypical development using methods for automatically recognizing children's emotional states by vocalizations, speech and facial expression.

Keywords: emotional development, methodological approach for assessing emotional development, manifestation and perception of the emotional state, autism spectrum disorders.

УДК 612.8

ОСОБЕННОСТИ ПОНИМАНИЯ РЕЧИ У МЛАДШИХ ШКОЛЬНИКОВ С РАС И ИХ СВЯЗЬ С ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЭЭГ. ЧАСТЬ I

© 2023 г. Е. Ю. Давыдова^{1, 2}, К. Р. Салимова¹ *, Д. В. Давыдов¹, Д. С. Переверзева¹, У. А. Мамохина¹, К. К. Данилина¹, С. А. Тюшкевич¹, Н. Л. Горбачевская¹

¹Федеральный ресурсный центр по организации комплексного сопровождения детей с расстройствами аутистического спектра ФГБОУ ВО МГППУ, Москва, Россия

²ФГБОУ ВО Московский государственный психолого-педагогический университет, Москва, Россия

*E-mail: salimovakr@mgppu.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 22.01.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Обсуждается проблема гетерогенности расстройства аутистического спектра (РАС) в плане выраженности аутистических проявлений, когнитивных и речевых способностей у детей с различным уровнем функционирования. Представлены результаты комплексного исследования понимания речи на уровне фонологии, лексики, морфосинтаксиса и дискурса у младших школьников с РАС. Выявлена связь выраженности аутистических проявлений социально-коммуникативного характера и невербального IQ с различными аспектами понимания речи. Сравнение структуры выявленных связей в подгруппах детей с разным уровнем функционирования выявило различия между подгруппами, свидетельствующие о различных механизмах нарушений. Показаны особенности спектральных характеристик электроэнцефалограммы (ЭЭГ) у детей с РАС по сравнению с возрастной нормой, и особенности этих характеристик у исследованных подгрупп. Выявлены различия спектральных характеристик ЭЭГ между подгруппами с РАС с разным уровнем функционирования: для подгруппы с менее выраженными нарушениями наблюдается более высокий индекс β_2 -активности, в подгруппе с более выраженными нарушениями — увеличение медленноволновой активности.

Ключевые слова: речевые нарушения, аутизм, расстройства аутистического спектра, ЭЭГ, вербальная коммуникация.

DOI: 10.31857/S0131164622600860, **EDN:** GDDUAN

Понимание речи при РАС. Несмотря на то, что языковые и когнитивные нарушения не являются диагностическими признаками расстройства аутистического спектра (РАС) и могут проявляться в различной степени, исследования речи имеют важное практическое и теоретическое значение. Около 60% детей с РАС имеют сопутствующие языковые нарушения [1] и до 30% детей остаются невербальными или минимально вербальными в дошкольном возрасте [2, 3]. Спектр речевых нарушений при РАС чрезвычайно широк и изучен неравномерно. Большое количество исследований посвящено изучению довербальных коммуникативных аспектов поведения и предикторов речевого развития [4–6]. Другим хорошо разработанным направлением является исследование различных аспектов речи у высокофункциональных лиц с аутизмом [7]. Недостаточная изученность речевых особенностей детей младшего и среднего школьного возраста с выраженными аутистическими проявлениями обусловлена, в

первую очередь, тем, что процесс тестирования осложнен из-за нарушений социального взаимодействия, недостаточного понимания инструкций, характерных для этой категории детей [8, 9]. Вместе с тем, именно трудности восприятия и понимания речи часто регистрируются у детей с РАС. И речь идет не только о задержке развития речи, но и о качественном своеобразии различных аспектов речи. Было показано, что характерное для детей с типичным развитием преобладание навыков рецептивной речи над экспрессивной у детей с РАС выражено гораздо меньше [5, 10]. По данным А. Goodwin, РАС является одной из причин медленного расширения речевого репертуара у детей [11]. Исследование пассивного словарного запаса у детей до 5 лет выявило наличие группы слов, которые лучше понимаются детьми с РАС и группы слов, в понимании которых имеют преимущество дети с типичным развитием [12], что еще раз подчеркивает важность изучения понимания речи, как фактора, влияющего на резуль-

таты оценки большинства проб. Гетерогенность проявлений речевых нарушений свидетельствует об актуальности комплексного исследования особенностей понимания речи у детей с различным уровнем функционирования и степенью выраженности проявлений аутизма.

Нейрофизиологические исследования речи в норме и при РАС. Данные многочисленных исследований отдельных компонентов речевой функции нейрофизиологическими методами свидетельствуют об отличиях практически на каждом уровне анализа: от обнаружения и различения отдельных звуков речи до понимания слов и предложений. Так в исследованиях характеристик связанных с событиями потенциалов с использованием парадигмы пассивного прослушивания было выявлено замедление дифференциации речевых стимулов у детей с РАС относительно нормы. Однако специфика выявленных различий варьировала в зависимости от задач и характеристик группы, причем наибольшая выраженность различий в показателях мозговой активности наблюдалась у детей младшего возраста и при более сложных формах речи [13]. Анализ лингвистической информации — сложный процесс, нейрофизиологические исследования особенностей понимания и порождения речи показывают, что во время речевой деятельности активируются как сенсорные, так и моторные области головного мозга [14]. В этом контексте информативными для исследования восприятия речи на электроэнцефалограмме (ЭЭГ) могут быть параметры сенсомоторного ритма [15].

В группе РАС речевые нарушения возникают на этапах раннего развития ребенка и затрагивают различные уровни речевого взаимодействия: прелингвистическое взаимодействие, понимание обращенной речи, этап звуковой имитации, развитие речевого гнозиса и др. [16]. Имеются данные, что при типичном развитии онтогенез речевой системы связан с развитием системы зеркальных нейронов [15]. Поскольку показано, что при РАС может быть нарушена работа системы зеркальных нейронов, которая на ЭЭГ проявляется в виде измененных характеристик μ -ритма [17], речевые нарушения в этой группе также могут проявляться в том числе измененными характеристиками μ -ритма, в частности отсутствии десинхронизации или изменениями частоты/локализации.

В исследовании *Y. Xiao et al.* оценивали восприятие эмоционально окрашенной речи у младенцев с РАС и типично развивающихся детей совместно с регистрацией функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) [18]. Было показано снижение реактивности височных зон коры головного мозга у детей с РАС при предъявлении речевых стимулов. Авторы предположили, что нарушение развития височных корковых си-

стем, которые в норме реагируют на аффективную речь родителей, а также дефицит социальных и коммуникативных особенностей у детей с РАС обуславливали снижение поведенческого предпочтения речи матери. Эти данные могут быть важны в понимании нейробиологической основы ранних речевых нарушений в этой группе.

Исследования вызванных потенциалов у детей с РАС выявили, что нарушения в нейронных системах, которые отвечают за произвольную ориентацию на изменения звуков, могут быть специфическими для обработки речевых стимулов у детей с РАС [19]. Также было показано, что речевые нарушения у детей с РАС могут быть связаны со сниженным уровнем обработки эмоционально окрашенной речи [20].

В литературе имеется достаточное количество работ, посвященное исследованиям речи с помощью электроэнцефалограммы (ЭЭГ), однако в большинстве из них нейрофизиологическая основа речевого взаимодействия изучается с помощью вызванных потенциалов. В настоящей работе использовали количественную оценку параметров электроэнцефалограммы совместно с оценкой речевых навыков у детей с РАС.

Целью настоящей работы было изучение особенностей понимания речи у младших школьников с РАС. Учитывая выраженную гетерогенность группы РАС по комплексу параметров была выдвинута гипотеза о наличии подгрупп, отличающихся по комплексу показателей когнитивного развития и параметрам биоэлектрической активности головного мозга внутри исследуемой группы. Работа включала задачи: оценку уровня понимания речи у младших школьников с РАС по фонологическому, лексическому, морфосинтаксическому и дискурсивному параметрам в целом и в подгруппах с разным уровнем функционирования; сопоставление показателей понимания речи с данными обследования интеллекта и выраженностью и спецификой аутистических проявлений; анализ показателей биоэлектрической активности мозга, характерных для подгрупп детей с РАС в сравнении с возрастной нормой.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 45 детей (37 мальчиков, 8 девочек), обучающихся в начальной школе для детей с РАС (школа ФРЦ МГППУ “РАССВЕТ”, г. Москва) по адаптированным основным образовательным программам (АООП) 8.1 и 8.2. Выборка была разделена на две подгруппы в соответствии с вариантом образовательной программы, рекомендованным психолого-медико-педагогическим консилиумом (ПМПК). Группа 8.1 (рекомендована детям с РАС, достигающим к началу обучения возрастных показателей развития),

Таблица 1. Распределение участников исследования по диагностическим группам в экспериментальных подгруппах

Программа обучения диагн. группа (по <i>ADOS-2</i>)	8.1 (средний возраст 10.42 станд. откл. 0, 746)	8.2 (средний возраст 10.30 станд. откл. 1, 225)	Всего
Аутизм	16	21	37
Спектр	4	4	8
Всего	20	25	45

группа 8.2 (рекомендована детям с РАС, не достигающим к началу обучения возрастных показателей развития).

Распределение в группы 8.1. и 8.2 осуществлялось на основании рекомендаций ПМПК и соответствовало реализуемой программе. Возраст испытуемых составлял 8–12 лет (табл. 1), у всех детей диагноз “аутизм” был подтвержден врачом-психиатром. Степень выраженности аутистических проявлений оценивали при помощи Плана диагностического обследования при аутизме (*ADOS-2*), в соответствии с алгоритмом которого был определен вариант диагностической группы для каждого учащегося: “аутизм” или “спектр аутизма”. При обработке данных вся группа детей была разделена на подгруппы по программам (8.1, 8.2) или диагностической группе *ADOS-2* (аутизм, спектр).

Методы исследования. Оценка уровня понимания речи проводили при помощи батареи тестов КОРАБЛИК (“Клиническая оценка развития базовых лингвистических компетенций”) [21]. Процедура оценки реализуется индивидуально с использованием звуковых и зрительных стимулов, предъявляемых при помощи планшета. Объективизация результатов обеспечивается не только инвариантностью процедуры, но и наличием полуавтоматической обработки данных — программа автоматически подсчитывает результаты отдельных субтестов. Это снижает вероятность ошибки при обработке данных. Анализировали результаты выполнения 5 субтестов, включающих от 16–24 проб: “Различение звуков” (фонология) — определение идентичности или не идентичности псевдослов в паре при предъявлении на слух; “Понимание существительных” и “Понимание глаголов” (лексика) — выбор изображения соответствующее предъявленному слову; “Понимание предложений” (морфосинтаксис) — выбор сюжетной картинки, соответствующей услышанному предложению; “Понимание текста” (дискурс) — прослушивание текста с последующим ответом на вопросы посредством выбора кнопки “да”, “нет”. Количественный результат оценки представлял процент успешно выполненных проб по каждому субтесту и блоку “понимание речи” в целом.

Для оценки невербального интеллекта (*NVIQ*) использовали соответствующие субтесты из батареи тестов Кауфманов (*KABC-II*) и теста Векслера (*WISC-III*).

Степень выраженности аутистических проявлений оценивали при помощи методики “План диагностического обследования при аутизме” (*ADOS-2*). *ADOS-2* — структурированный протокол наблюдения, направленный на выявление особенностей поведения, характерных для расстройств аутистического спектра: оценивается общение, социальное взаимодействие, игра и воображение, наличие стереотипных форм поведения и ограниченных интересов. Результатом *ADOS-2* является отнесение испытуемого к одной из трех диагностических групп: “аутизм”, “спектр аутизма” или “вне спектра аутизма”. Также по десятибалльной шкале рассчитывается сравнительный балл, отражающий степень выраженности аутистических проявлений по сравнению с другими испытуемыми с РАС того же возраста и уровня владения речью [22, 23]. Для статистического анализа результатов использовали суммарный сырой балл по шкалам “Социальный аффект” и “Ограниченные и стереотипные формы поведения”.

Нейрофизиологическую оценку проводили с помощью ЭЭГ-мониторинга. Запись ЭЭГ осуществляли с помощью 16-канального электроэнцефалографа (“Нейро-КМ”, Россия) в состоянии покоя (с закрытыми и открытыми глазами), а также при функциональных пробах (наблюдение за движением, сжатие руки в кулак). Использовали международную систему “10–20%”, электроды располагали в следующих отведениях: F_3 , F_4 , F_7 , F_8 , C_3 , C_2 , C_4 , P_3 , P_2 , P_4 , O_1 , O_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , в качестве референтных использовали объединенные ушные электроды. Во время регистрации ЭЭГ дети находились в затемненной комнате в положении сидя. Частота оцифровки составляла 128 Гц, полоса пропускания — от 0.5 до 30 Гц. Для последующего анализа была взята только проба в состоянии спокойного бодрствования при закрытых глазах. Компьютерную обработку полученных данных осуществляли методом быстрого преобразования Фурье при помощи систем картирования электрической активности головного мозга аппаратно-программного комплекса

“*Brainsys*” [24]. В анализ включали не менее 20 безартефактных отрезков длиной в 4 с записи ЭЭГ с предварительно удаленными артефактами. Определяли спектральную мощность для стандартных полос частот (δ 1–4 Гц, θ 4–7 Гц, α 8–13 Гц, β_1 13–20 Гц и β_2 20–30 Гц) и узких частотных полос (1 Гц).

Для сравнения детей с диагностической группой “Аутизм” с возрастной нормой производили статистические вычисления при помощи *Z*-статистики, встроенной в программу “*Brainsys*” [24]. Данное программное обеспечение включает непараметрические банки данных спектральных параметров ЭЭГ 900 испытуемых, учитывающие пол и возраст обследуемых детей, подростков и взрослых. Сопоставление с нормативными ЭЭГ-данными проводится при помощи “*Z*-критерия”, в котором величина *Z* определяется как степень отклонения от среднего по нормативной группе в единицах стандартного отклонения (*SD*). Статистический расчет *Z*-критерия включает в себя поправку на множественные сравнения. Результаты представлены в виде цветовых карт значений логарифма мощности автоспектра.

Для сравнения ЭЭГ-записей детей из подгрупп 8.1 и 8.2 использовали статистический критерий Манна–Уитни. Для этого также в программе “*Brainsys*” производили построение автоспектров, которые сравнивали между собой с помощью непараметрического критерия Манна–Уитни. Результат сравнения представлял собой величину *p*-значения. В случае, когда *p*-значение меньше 0.05, различия между автоспектрами и, следовательно, между ЭЭГ-записями считали достоверными. Результаты представлены в виде “карт *p*-значений”, на которых цветом обозначена величина *p*-значения в каждом отведении. Таким образом, производится сравнение автоспектра, построенного по одной ЭЭГ-записи, с автоспектром, построенным по другой ЭЭГ-записи, в заданном частотном диапазоне в каждом отведении. В случае, если значения автоспектра, построенного по первой ЭЭГ-записи, больше, чем значения автоспектра, построенного по второй ЭЭГ-записи (т.е., если в первой ЭЭГ-записи суммарная амплитуда колебаний в данном частотном диапазоне превышает таковую во второй ЭЭГ-записи), *p*-значению приписывают знак “+”. В обратном случае, *p*-значению присваивают знак “–”.

Для корреляции ЭЭГ-записей детей из подгрупп 8.1 и 8.2 с параметром “Понимание текста” в программе “*Brainsys*” рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена. Результаты представлены в виде цветовых карт *p*-значений спектра мощности.

При статистической обработке данных были использованы методы описательной статистики, определение значимости различий по критерию

Манна–Уитни, корреляционный анализ по Пирсону и однофакторный дисперсионный анализ (*ANOVA*). Статистическую обработку данных проводили в программной среде *SPSS*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценка речевых навыков. В целом, дети лучше справились с заданиями на понимание существительных и глаголов, при этом анализ оценки результатов выполнения заданий на понимание речи выявил выраженную неравномерность показателей как по отдельным субтестам, так и профилю успешности для большинства детей, что оценивалось дополнительной переменной “Неравномерность профиля понимания речи”, которая рассчитывалась как сумма квадратов разностей между каждой парой переменных.

Анализ корреляционных связей между параметрами оценки понимания речи, невербальным *IQ* и степенью выраженности аутистических проявлений (по *ADOS-I*) выявил достоверные корреляции между параметрами: сырой балл по *ADOS-II* и параметрами: “понимание глаголов” ($r = -0.523$ $p = 0.001$), “понимание предложений” ($r = -0.303$ $p = 0.043$), “понимание текста” ($r = -0.474$ $p = 0.001$), суммарный балл “понимание речи” ($r = -0.518$ $p = 0.001$) и “неравномерность профиля развития речи” ($r = 0.451$ $p < 0.002$), “невербальный *IQ*” ($r = 0.387$ $p = 0.022$). Для показателя невербального *IQ* были выявлены связи с параметрами: “понимание глаголов” ($r = 0.336$ $p = 0.042$), “понимание текста” ($r = 0.476$ $p = 0.004$), суммарный балл “понимание речи” ($r = 0.456$ $p = 0.004$) и “неравномерность профиля развития речи” ($r = -0.389$ $p = 0.021$), также с баллом по шкале “Социальный аффект” (по *ADOS-II*) ($r = 0.879$ $p = 0.001$). Эти результаты согласуются с полученными ранее данными [25], однако разделение выборки позволило выявить значительные различия в подгруппах с разным уровнем функционирования.

Анализ тех же параметров в подгруппах, показал, что результаты, характерные для общей выборки обусловлены преимущественно эффектом большей выраженности нарушений в подгруппе 8.2, тогда как в подгруппе 8.1 лишь параметры “понимание глаголов” и “сумма понимание” оказались достоверно связаны с большей выраженностью аутистических проявлений, относящихся к категории нарушений социально-коммуникативного аспекта поведения (табл. 2).

Анализ внутренних корреляций между речевыми параметрами также выявил различия между подгруппами. Так для подгруппы 8.1 показатель “различение звуков” коррелировал с “пониманием существительных” и “пониманием предложений” ($r = 0.53$ $p = 0.02$ и $r = 0.54$ $p = 0.018$ соот-

Таблица 2. Достоверные корреляции между параметрами понимания речи, выраженности аутистических проявлений (по *ADOS-II*) и невербальным *IQ* для подгрупп 8.1 и 8.2

Вариант АООП	8.1			8.2		
параметры	сум. <i>ADOS</i>	соц. аффект <i>ADOS</i>	<i>NV IQ</i>	сум. <i>ADOS</i>	соц. аффект <i>ADOS</i>	<i>NV IQ</i>
Различение звуков				−0.487*		
Понимание глаголов	−0.649**	−0.639*		−0.576**	−0.645*	0.434*
Понимание предложений				−0.527**		0.497*
Понимание текста				−0.688**	−0.735**	0.471*
Сумма “понимание”	−0.445*	−0.631*		−0.730**	−0.714**	0.520*
Неравномерность профиля				0.622**	0.754**	−0.435*

Примечание: АООП – адаптированная основная общеобразовательная программа. * – $p < 0.05$; ** – $p < 0.01$.

ветственно)). “Понимание предложений” умеренно коррелировало с “пониманием текста” ($r = 0.47$, $p = 0.037$). Для группы 8.2 были выявлены значимые корреляционные связи практически между всеми параметрами: различение звуков – понимание глаголов ($r = 0.56$, $p = 0.003$), понимание предложений ($r = 0.469$, $p = 0.016$), понимание текста ($r = 0.619$, $p = 0.001$). Понимание существительных – понимание глаголов ($r = 0.602$, $p = 0.001$), понимание предложений ($r = 0.524$, $p = 0.002$), понимание текста ($r = 0.422$, $p = 0.025$). Понимание глаголов – понимание предложений ($r = 0.528$, $p = 0.002$), понимание текста ($r = 0.485$, $p = 0.009$). Понимание предложения – понимание текста ($r = 0.48$, $p = 0.01$). Сравнение групп 8.1 и 8.2 при помощи однофакторного дисперсионного анализа *ANOVA* и непараметрического критерия Манна-Уитни выявили согласованные достоверные различия между группами практически по всем речевым параметрам (рис. 1). По выраженности аутистических проявлений (сырой балл по *ADOS* и балл по шкале “Социальный аффект”) а также по невербальному *IQ* различий не выявлено.

Нейрофизиологическая оценка. На этапе нейрофизиологического анализа сначала проводилось сравнение данных ЭЭГ-картирования в группе “Аутизм” с возрастной нормой. На рис. 2 представлены спектральные карты логарифма мощности с шагом 1 Гц для всех частотных диапазонов; δ , θ , α , β_1 , β_2 . Максимальное значение *SD* зарегистрировано для δ -диапазона частот в лобно-центральных отведениях (2–3 Гц, $\max SD = +2.2$) и для β_2 полосы частот в центрально-лобных отведениях (23–30 Гц, $\max SD = +1.3$).

После этого проводилось сравнение спектральных характеристик ЭЭГ между группами, обучающимися по программам 8.1 и 8.2 с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни. На рис. 3 представлены карты p -значений спектральной мощности автоспектра в диапазонах по 1 Гц в интервале от 0.5 до 30 Гц. Цветовая шкала справа отражает величину p -значения:

если мощность автоспектров для подгруппы 8.1 меньше таковой для подгруппы 8.2 при $p < 0.05$, различия показаны синим цветом, при обратной ситуации – розовым цветом. При $p < 0.05$ выявлены отличия группы 8.2 от 8.1 в виде более высокого индекса β_1 -активности в теменно-центральных и лобных отведениях в полосе 12–18 Гц, а также увеличения индекса медленноволновой δ - и θ -активности в центрально-лобных отведениях в полосе 1–3 и 4–7 Гц.

Корреляции спектральных характеристик ЭЭГ с показателем “понимание текста” в группах детей с РАС, обучающихся по программам 8.1 и 8.2 вычисляли с помощью критерия Спирмена. На рис. 4 представлены карты p -значений спектральной мощности в диапазонах по 1 Гц в интервале от 0.5 до 30 Гц. В группе 8.1 выявлена отрицательная корреляция этого параметра с уровнем β_2 -активности в полосе 22–27 Гц в центральных отведениях ($r = -0.51$, $p = 0.045$), а в группе 8.2 – с уровнем δ -активности в центрально-лобных отведениях ($r = -0.36$, $p = 0.026$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Гетерогенность проявлений РАС описывается в современной научной литературе с различных сторон и исследователи приходят к выводу, что индивидуальная картина определяется комплексом факторов, относящимся к различным аспектам психической деятельности ребенка [26]. Описаны как случаи достаточно успешного функционирования при значительном нарушении одних функций и сохранности других, так и случаи относительно равномерно распределенных умеренных нарушений, приводящих в совокупности к тяжелым ограничениям. Не являясь диагностическим критерием аутизма, уровень развития речи, тем не менее, является надежным предиктором успешности адаптации и его динамика может рассматриваться как один из показателей эффективности вмешательств. Вместе с тем нарушения социального взаимодействия, наблюдающиеся

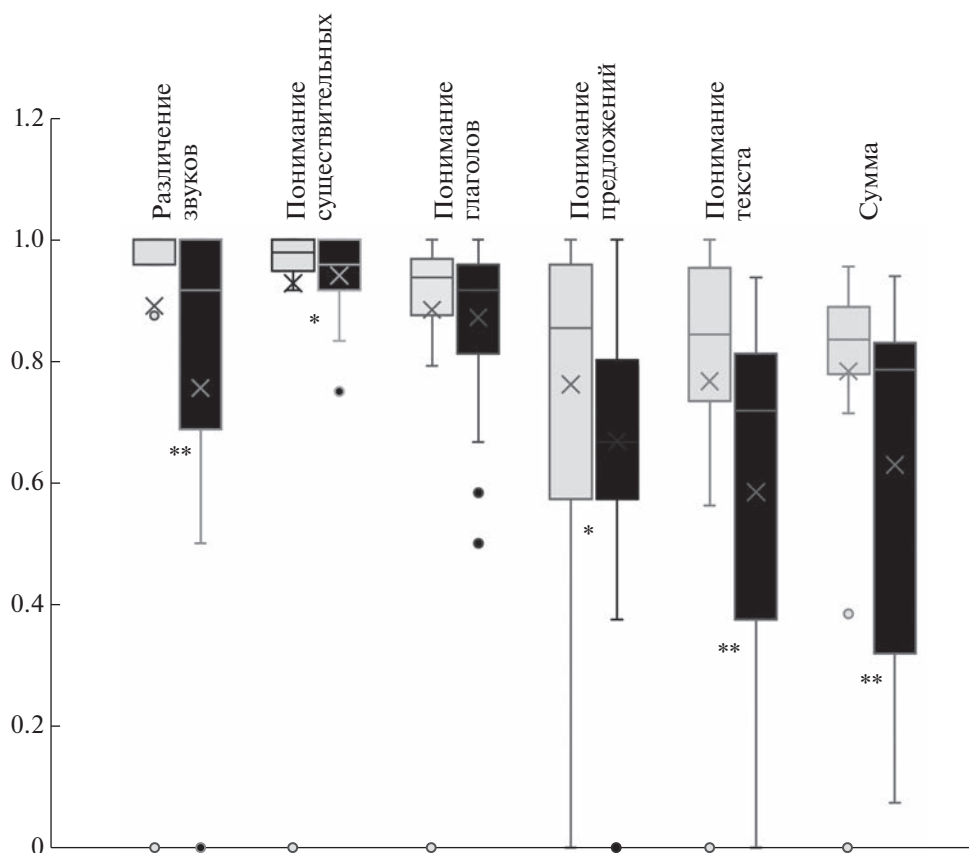


Рис. 1. Сравнение параметров понимания речи у младших школьников, обучающихся по программе 8.1 (светлые столбики) и 8.2 (черные столбики).

Достоверность различий по критерию Манна–Уитни: * — $p < 0.05$, ** — $p < 0.01$. По шкале ординат представлены относительные баллы для подгрупп 8.1 и 8.2, по шкале абсцисс — исследуемые субтесты, слева направо: различение звуков, понимание существительных, понимание глаголов, понимание предложений, понимание текста, суммарный балл понимания.

при РАС, могут быть обусловлены также недостаточным уровнем понимания речи [9], что подтверждается полученными нами данными о связи показателей понимания речи с выраженностью аутистических проявлений и невербальным IQ у детей нуждающихся в более серьезной адаптации образовательной программы для обучения. С другой стороны, выраженная неравномерность профиля понимания речи, зафиксированная у детей именно этой подгруппы, может как раз и отражать гетерогенность этиологии наблюдаемых нарушений. Для уточнения этого предположения необходимо комплексное исследование показателей функционирования в сопоставлении с параметрами биоэлектрической активности мозга.

В комплексных исследованиях гетерогенности РАС важное место занимает оценка биоэлектрической активности головного мозга. В проведенном исследовании были выявлены отклонения амплитудно-частотных характеристик ЭЭГ у детей с диагностической группой “аутизм” от нормативных показателей: увеличение индекса β_2 -ак-

тивности в лобно-центральных и теменных областях, а также медленноволновой активности в лобно-центральных областях. Увеличение индекса β_2 -активности у детей с диагностической группой “аутизм” согласуется с имеющимися литературными данными о том, что повышение уровня β -активности при РАС объясняется дисбалансом процессов возбуждения и торможения, в сторону преобладания процессов возбуждения [27]. Такой дисбаланс авторы связывают, в том числе, с нарушением работы ГАМК-эргической системы нейронов. В других исследованиях было показано, что ЭЭГ детей с недифференцированной формой РАС характеризуется более высокой мощностью θ - и β -ритмов [28], что также отражает дисбаланс процессов возбуждения–торможения.

В понимании характера нарушений при РАС важное место занимает теория нарушения работы зеркальных нейронов. Имеются данные, что система зеркальных нейронов является нейробиологической основой подражания [17]. На ЭЭГ косвенным показателем активности зеркальных

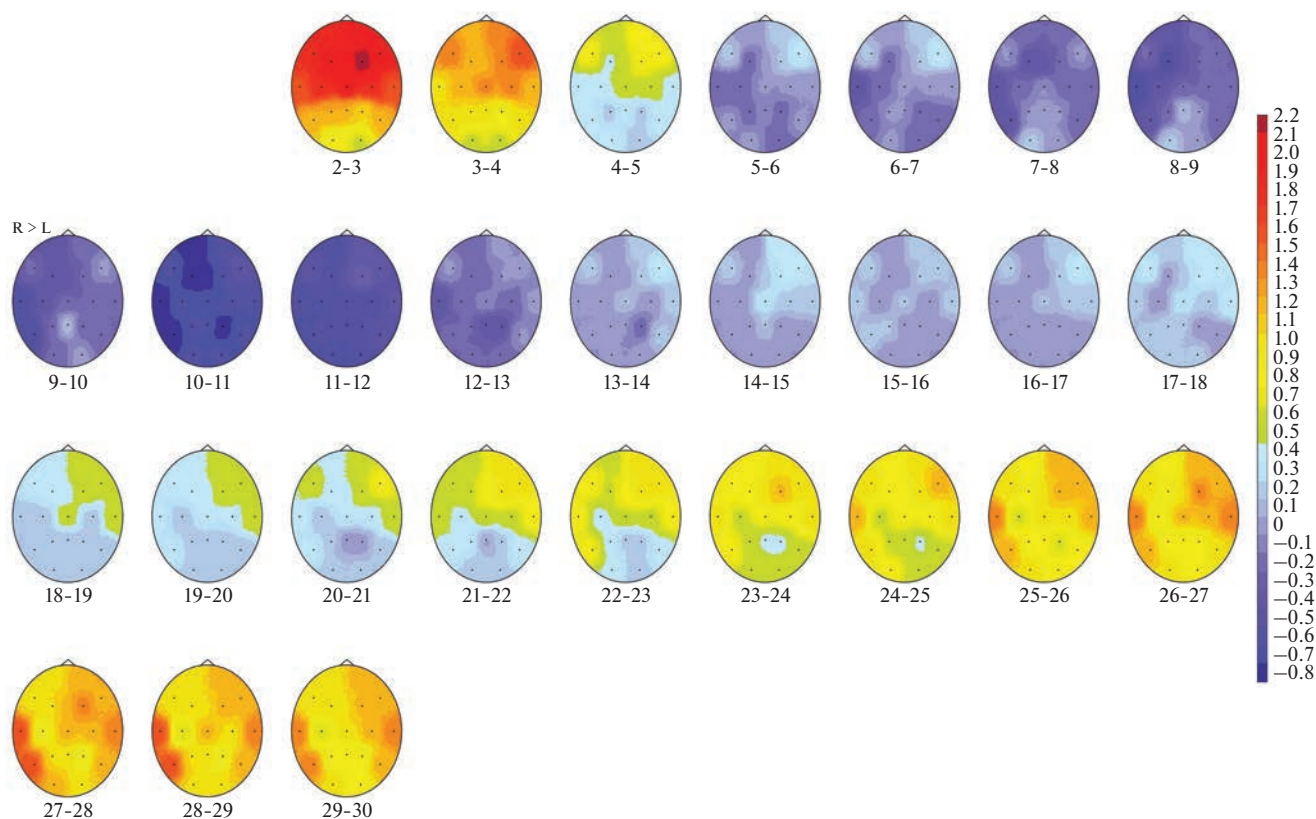


Рис. 2. Спектральные карты логарифма мощности автоспектра при сравнении ЭЭГ-записей группы “Аутизм” в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами с возрастной нормой с помощью Z -статистики. Частотные диапазоны представлены в интервале 2–30 Гц с шагом 1 Гц (2–3, 3–4 Гц и т.д.). Шкала справа отражает величину SD ($SD > 0$ соответствует отклонениям выше возрастной нормы, $SD < 0$ – отклонениям ниже возрастной нормы). Максимальное значение SD составляет (+2.2), минимальное – (–0.8). Различия представлены для уровня значимости $p < 0.05$.

нейронов считается μ -ритм. Относительно РАС, показано, что социально-коммуникативные особенности этой группы могут быть обусловлены нарушением работы системы зеркальных нейронов, которое коррелирует с отсутствием десинхронизации μ -ритма при выполнении моторных проб [29]. Помимо нарушения десинхронизации μ -ритма, имеются данные, что у некоторых людей с РАС μ -ритм регистрируется в β_1 полосе частот (12–15 Гц) при сохранении остальных его характеристик (локализация, десинхронизация при движении) [17, 29]. В этом аспекте интерес представляют полученные в настоящем исследовании данные о более высоком индексе β_1 -активности в группе 8.2 по сравнению с группой 8.1, особенно на частотах 12–15 Гц. С одной стороны, эти данные могут говорить о более выраженных процессах возбуждения в этой группе по сравнению с детьми с более высоким уровнем функционирования [27]. С другой стороны, учитывая данные об атипичных характеристиках μ -ритма в группе РАС, необходимо проверить, насколько β_1 -диапазон может отражать нарушения подражатель-

ного поведения в этой группе, и, следовательно, потенциальные нарушения работы зеркальных нейронов.

Увеличение индекса медленноволновой активности в группе РАС представляет не меньший интерес, чем другие особенности ЭЭГ. В нашем исследовании эти изменения наблюдались при отсутствии знаков локальной органической патологии. По данным некоторых авторов наличие диффузной медленной активности в ЭЭГ детей с психической патологией может свидетельствовать об органических нарушениях, возникших на ранних этапах онтогенеза [30, 31]. С другой стороны, показано, что при РАС нарушаются нормальные онтогенетические закономерности формирования ЭЭГ [31]. Она отличается от нормативной не только по показателям спектральной плотности в разных зонах коры, но и по закономерностям их возрастной динамики. Так при нормотипичном онтогенезе индекс диффузной медленной активности снижается к 7–8 годам [31], что не всегда наблюдается при РАС. Увеличение индекса диффузной медленной активности мо-

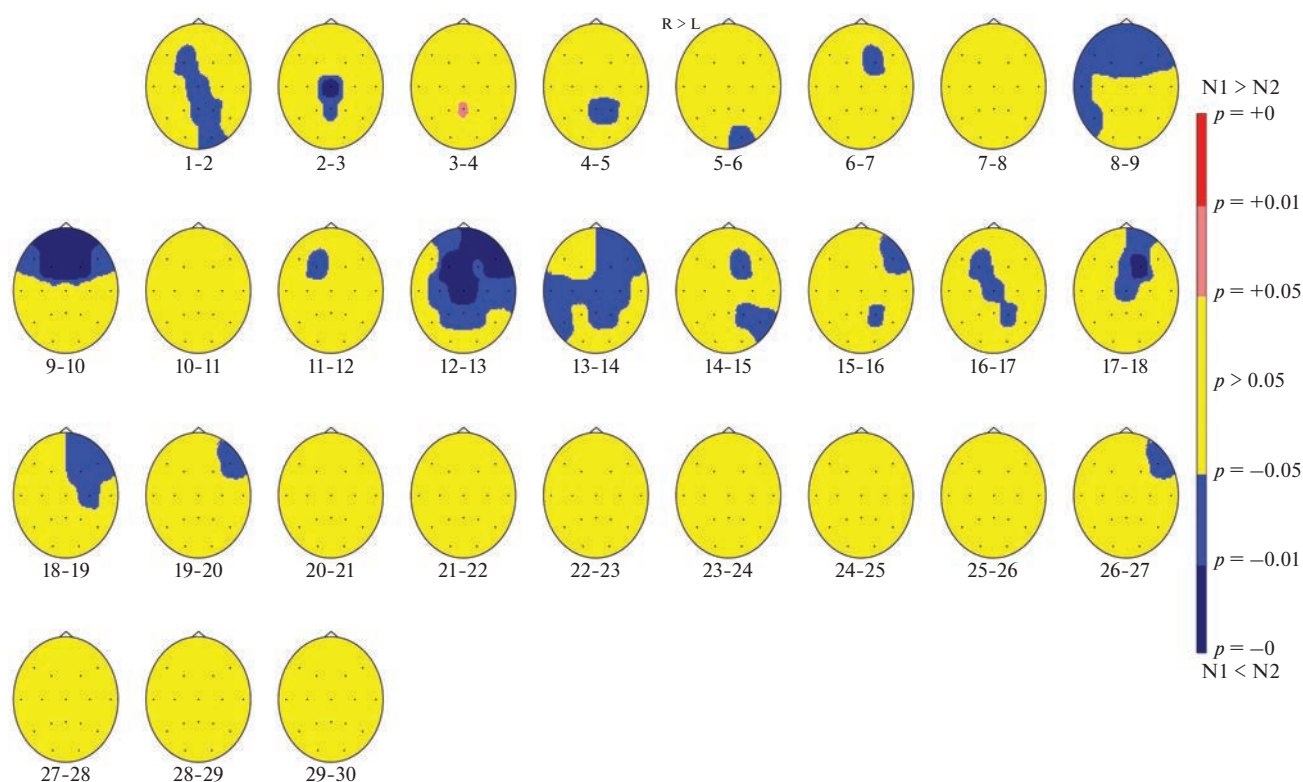


Рис. 3. Карты p -значений в диапазонах по 1 Гц в интервале от 0.5 до 30 Гц, полученные в результате сравнения по критерию Манна–Уитни ЭЭГ-записей ЭЭГ групп, обучающихся по программам 8.1 (N1) и 8.2 (N2). Шкала справа отражает величину p -значения: для $N1 < N2$ p -значения приведены со знаком (–), для $N1 > N2$ – со знаком (+).

жет быть связано с повышенной активностью гипоталамо-гипофизарного комплекса и, с другой стороны, со снижением регулирующего влияния корковых структур [30]. В нашей работе интерес представляет группа 8.2 с более низким уровнем функционирования, в которой лучше понимали текст дети с более низким индексом медленной активности. В контексте вышеприведенных данных можно предполагать наличие в этой группе определенных структурных нарушений, которые требуют более подробных исследований в будущем с расширением применяемых методик.

Понимание текста в группе с более высоким уровнем функционирования отрицательно коррелировало с индексом β_2 -активности. Амплитудно-частотные характеристики ЭЭГ отражают процессы корково-подкоркового взаимодействия, в этом смысле доминирование высокочастотной β -активности при РАС может свидетельствовать о дисбалансе нейромедиаторных систем мозга, что было показано разными авторами [27, 28, 31]. В связи с этим в этой группе трудности понимания речи могут объясняться другими причинами, чем в группе 8.2.

Таким образом, при разделении гетерогенной группы РАС по критерию уровня функциониро-

вания были выделены подгруппы, отличающиеся по параметрам понимания речи, и имеющие разные особенности биоэлектрической активности головного мозга. Дальнейшее исследование этих подгрупп требует расширения перечня анализируемых параметров и методик в рамках концепции многопараметрической типологизации РАС.

ВЫВОДЫ

1. Для детей с РАС с большей выраженностью аутистических проявлений социально-коммуникативного характера и более низкими показателями невербального интеллекта характерно снижение уровня понимания речи.
2. Уровень понимания речи является ключевым фактором, обуславливающим необходимость адаптации образовательной программы для младших школьников с РАС.
3. Для детей с диагностической группой “Аутизм” (по *ADOS-2*) характерно отклонение показателей ЭЭГ от нормативных: в этой группе наблюдается увеличение индекса β_2 -активности, а также индекса медленноволновой активности.
4. В группе с менее выраженными нарушениями функционирования при РАС более высокий

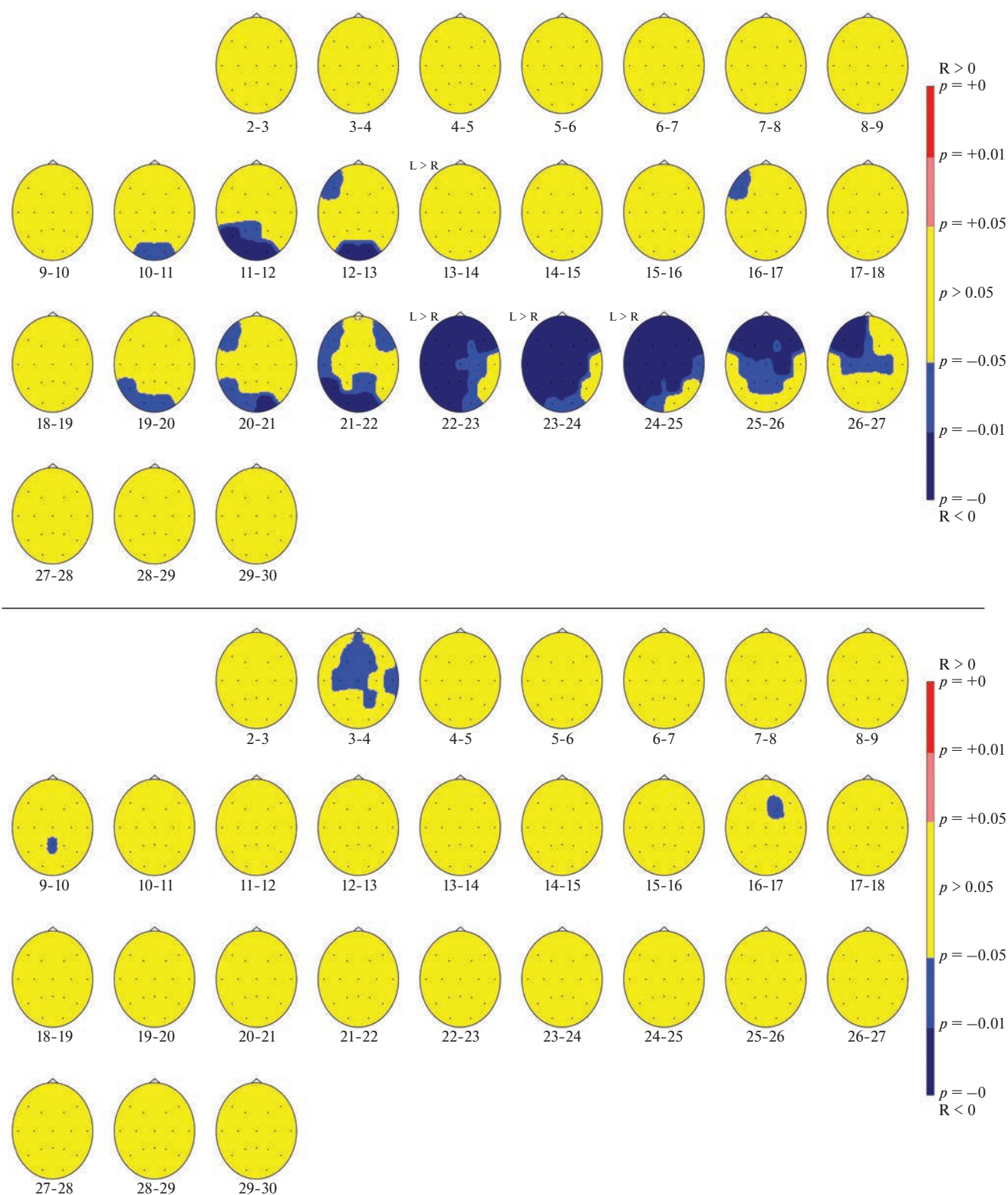


Рис. 4. Корреляция спектральных характеристик ЭЭГ (проба закрытые глаза) с параметром “Понимание текста”. Представлены карты p -значений спектральной мощности в диапазонах по 1 Гц в интервале от 0.5 до 30 Гц. Шкала справа отражает величину p -значения и знак корреляции: для $R < 0$ p -значения приведены со знаком (–), для $R > 0$ – со знаком (+). Данные сверху вниз: группа 8.1, группа 8.2.

уровень понимания речи связан с меньшим индексом β_2 -активности, а в группе с более выраженными — с меньшим индексом медленноволновой активности.

5. В группе младших школьников с РАС выделяются подгруппы, различающиеся как по уровню понимания речи, так и по особенностям биоэлектрической активности головного мозга.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Московского государственного психолого-педагогического университета (Москвы).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства просвещения РФ № 073-00110-22-06 от 12.12.2022 г.

Благодарности. Авторы выражают благодарность всем участникам исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Все авторы внесли равный вклад в подготовку данной публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levy S.E., Giarelli E., Lee L.C. et al. Autism spectrum disorder and co-occurring developmental, psychiatric, and medical conditions among children in multiple populations of the United States // J. Dev. Behav. Pediatr. 2010. V. 31. № 4. P. 267.
2. Norrelgen F., Fernell E., Eriksson M. et al. Children with autism spectrum disorders who do not develop phrase speech in the preschool years // Autism. 2015. V. 19. № 8. P. 934.
3. Tager-Flusberg H., Kasari C. Minimally verbal school-aged children with autism spectrum disorder: the neglected end of the spectrum // Autism Res. 2013. V. 6. № 6. P. 468.
4. Su P.L., Rogers S.J., Estes A., Yoder P. The role of early social motivation in explaining variability in functional language in toddlers with autism spectrum disorder // Autism. 2020. V. 25. № 1. P. 244.
5. Weismer E.S., Lord C., Esler A. Early language patterns of toddlers on the autism spectrum compared to toddlers with developmental delay // J. Autism Dev. Disord. 2010. V. 40. № 10. P. 1259.
6. Thurm A., Manwaring S.S., Swineford L., Farmer C. Longitudinal study of symptom severity and language in minimally verbal children with autism // J. Child Psychol. Psychiatry. 2015. V. 56. № 1. P. 97.
7. Broome K., McCabe P., Docking K. et al. Speech Abilities in a Heterogeneous Group of Children With Autism // J. Speech Lang. Hear. Res. 2021. V. 64. № 12. P. 4599.
8. Charman T., Taylor E., Drew A. et al. Outcome at 7 years of children diagnosed with autism at age 2: Predictive validity of assessments conducted at 2 and 3 years of age and pattern of symptom change over time // J. Child Psychol. Psychiatry. 2005. V. 46. № 5. P. 500.
9. Skwerer D., Jordan S.E., Brukilacchio B.H., Tager-Flusberg H. Comparing methods for assessing receptive language skills in minimally verbal children and adolescents with autism spectrum disorders // Autism. 2016. V. 20. № 5. P. 591.
10. Gernsbacher M.A., Morson E.M., Grace E.J. Language development in autism / Neurobiology Language. Publisher: Elsevier, 2015. P. 879.
11. Goodwin A., Fein D., Naigles L.R. Comprehension of wh-questions precedes their production in typical development and autism spectrum disorders // Autism Res. 2012. V. 5. № 2. P. 109.
12. Виноградова К.Н. Речь и коммуникация при расстройствах аутистического спектра // Аутизм и нарушения развития. 2015. Т. 47. № 2. С. 17.
13. Key A.P., D'Ambrose S.K. Speech Processing in Autism Spectrum Disorder: An Integrative Review of Auditory Neurophysiology Findings // J. Speech Lang. Hear. Res. 2021. V. 64. № 11. P. 4192.
14. Möttönen R., Adank P., Skipper J.I. Sensorimotor Speech Processing: A Brief Introduction to the Special Issue // Brain Lang. 2018. V. 187. P. 18.
15. Saltuklaroglu T., Bowers A., Harkrider A.W. et al. EEG mu rhythms: Rich sources of sensorimotor information in speech processing // Brain Lang. 2018. V. 187. P. 41.
16. Мамохина У.А. Особенности речи при расстройствах аутистического спектра // Аутизм и нарушения развития. 2017. Т. 15. № 3. С. 24.
17. Салимова К.Р. Нейрофизиологические корреляты нарушения развития при расстройствах аутистического спектра (РАС) // Успехи современной биологии. 2021. Т. 141. № 6. С. 557.
18. Xiao Y., Wen T.H., Kupis L. et al. Neural responses to affective speech, including motherese, map onto clinical and social eye tracking profiles in toddlers with ASD // Nat. Hum. Behav. 2022. V. 6. № 3. P. 443.
19. Kujala T., Lepistö T., Näätänen R. The neural basis of aberrant speech and audition in autism spectrum disorders // Neurosci. Biobehav. Rev. 2013. V. 37. № 4. P. 697.
20. Galilee A., Stefanidou C., McCleery J.P. Atypical speech versus non-speech detection and discrimination in 4- to 6- yr old children with autism spectrum disorder: An ERP study // PLoS One. 2017. V. 12. № 7. P. e0181354.
21. Lopukhina A., Chrabaszcz, A., Khudyakova et al. Test for assessment of language development in Russian "KORABLIK" / Proceedings of the Satellite of

- AMLaP conference "Typical and Atypical Language Development Symposium". Moscow: HSE University, 2019. P. 30.
22. Лорд К., Раттер М., ДиЛаворе П. и др. ADOS-2: План диагностического обследования при аутизме, 2-я версия: Руководство / Пер. с англ. Сорокина А.Б., Давыдовой Е.Ю., Салимовой К.Р., Пшеничной Е. [Б.м.]: Western Psychological Services: Giunti O.S., 2016. 446 с.
Lord K., Ratter M., DiLavore P. et al. ADOS-2: Plan diagnosticheskogo obsledovaniya pri autizme, 2-ya versiya: Rukovodstvo [The Autism Diagnostic Observation Schedule. 2nd Edition: Manual]. Western Psychological Services: Giunti O.S., 2016. 446 p.
 23. Сорокин А.Б., Давыдова Е.Ю., Самарина Л.В. и др. Стандартизированные методы диагностики аутизма: опыт использования ADOS-2 и ADI-R // Аутизм и нарушения развития. 2021. Т. 19. № 1. С. 12.
 24. Горбачевская Н.Л., Митрофанов А.А. Роль количественных методов анализа электроэнцефалограммы в детской психиатрии // Медицинский алфавит. 2008. Т. 4. № 17. С. 13.
 25. Переверзева Д.С., Мамохина У.А., Давыдова Е.Ю. и др. Особенности понимания речи у детей с расстройствами аутистического спектра младшего школьного возраста [Электронный ресурс] // Клиническая и специальная психология. 2021. Т. 10. № 4. С. 137.
 26. Masi A., DeMayo M.M., Glozier N., Guastella A.J. An Overview of Autism Spectrum Disorder. Heterogeneity and Treatment Options // *Neurosci. Bull.* 2017. V. 33. № 2. P. 183.
 27. Marotta R., Risoleo M.C., Messina G. et al. The Neurochemistry of Autism // *Brain Sci.* 2020. V. 10. № 3. P. 163.
 28. Kozhushko N.J., Nagornova Z.V., Evdokimov S.A. et al. Specificity of spontaneous EEG associated with different levels of cognitive and communicative dysfunctions in children // *Int. J. Psychophysiol.* 2018. V. 128. P. 22.
 29. Bernier R., Dawson G., Webb S. et al. EEG mu rhythm and imitation impairments in individuals with autism spectrum disorder // *Brain Cogn.* 2007. V. 64. № 3. P. 228.
 30. Благодосклонова Н.К., Новикова Л.А. Детская клиническая электроэнцефалография. М.: Медицина, 1994. 204 с.
 31. Горбачевская Н.Л. Особенности формирования ЭЭГ у детей в норме и при разных типах общих (первазивных) расстройств развития. Автореф. дис. ... докт. биол. наук. М.: МГУ, 2000. 43 с.

Speech Understanding in Primary Schoolchildren with Autism Spectrum Disorders and Its Relationship with EEG Characteristics. Part I

E. Yu. Davydova^{a, b}, K. R. Salimova^{a, *}, D. V. Davydov^a, D. S. Pereverzeva^a, U. A. Mamokhina^a, K. K. Danilina^a, S. A. Tyushkevich^a, N. L. Gorbachevskaya^a

^aFederal Resource Center for Comprehensive Support for Children with Autism Spectrum Disorders, Moscow, Russia

^bMoscow State University of Psychology and Education, Moscow, Russia

*E-mail: salimovakr@mgppu.ru

The article discussed ASD heterogeneity in terms of the severity of autistic manifestations, cognitive and speech abilities in children with different levels of functioning. We present results of a study of speech understanding at the level of phonology, vocabulary, morphosyntax and discourse in primary schoolchildren with ASD. The study revealed correlations between the severity of autistic manifestations of a socio-communicative nature and non-verbal IQ with various aspects of speech understanding. Comparison of the correlations in the subgroups of children with different levels of functioning revealed differences between the subgroups, indicating different mechanisms of disorders. The differences of the spectral characteristics of the EEG in children with ASD compared with the age norm, and characteristics in the studied subgroups are shown. We revealed differences in EEG spectral characteristics between subgroups with ASD with different levels of functioning: the subgroup with less pronounced disorders is characterized by a higher index of β_2 -activity, while the subgroup with more pronounced disorders – by a higher index of slow-wave activity.

Keywords: speech disorders, autism, autism spectrum disorders, EEG, verbal communication.

УДК 612.821

ОКУЛОМОТОРНЫЕ РЕФЕРЕНТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧТЕНИЯ У ДЕТЕЙ С ДИСЛЕКСИЕЙ 9–11 ЛЕТ

© 2023 г. С. Р. Оганов¹, *, А. Н. Корнев¹

¹ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: oganov.s.r@gmail.com

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 30.01.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Нарушение процессов смысловой обработки письменного текста у детей с дислексией является актуальной и малоизученной проблемой. Интеграция деятельностного подхода и современных методов регистрации движений взгляда при чтении позволила предпринять системный структурно-функциональный анализ чтения как деятельности. Исследование посвящено анализу оculoмоторных параметров как референтов умственных действий, совершаемых в процессе чтения письменного текста детьми с дислексией 9–11 лет. Во время чтения текста производилась регистрация движений взгляда с помощью айтрекинг системы. Каждый ребенок получал 4 текста: 2 научных и 2 художественных (повествовательных). Исследовались такие характеристики движений взгляда как продолжительность и количество фиксации, амплитуда, частота встречаемости микро-, коротких, средних и длинных регрессивных саккад. Статистический ANOVA анализ полученных результатов выявил достоверные различия между детьми с дислексией и их здоровыми сверстниками по всем оculoмоторным характеристикам. Результаты исследования позволяют предполагать наличие у детей с дислексией дисфункции читательской деятельности не только на лексическом, но и на пропозиционально-смысловом уровне.

Ключевые слова: дислексия, понимание текста, оculoмоторное поведение, дети.

DOI: 10.31857/S0131164622600872, **EDN:** PCCMFI

Современные исследования чтения свидетельствуют о том, что чтение — это целенаправленный процесс создания индивидуальной семантической и смысловой версии текста [1, 2], который включает в себя процессы обработки графического пространства текста, письменноречевого дискурса и конструирования смыслового целостного образа текста. Многие авторы согласны с тем, что целесообразно различать, по меньшей мере, два уровня обработки текста при чтении: лексико-синтаксический (нижний) и интегративный, пропозиционально-смысловой (высший) уровни [3, 4].

Следует отметить, что в многочисленных работах, посвященных пониманию текста при чтении, преобладают те, в которых оценивается конечный продукт, результат осмысления прочитанного [5]. Для этого читателям предлагается ответить на ряд вопросов или пересказать прочитанное. Значительно меньше объективных данных о самом процессе обработки текста при чтении [6]. Среди методологических подходов, используемых в работах этого направления, наиболее продуктивны два: а) озвучивание мыслей, возникающих при чтении (*think aloud methods*) и б) реги-

страция движений взгляда при чтении [7]. На этом пути получено уже немало фактологических данных [8, 9]. Слабым местом остается их системный анализ. В частности, не вполне ясным остается вклад процессов низшего и высшего уровней обработки текста в конечный продукт понимания.

Деятельностный подход, разработанный в отечественной психологии [10], позволяет предпринять системный структурно-функциональный анализ чтения как деятельности. По мнению И.А. Зимней рассмотрение чтения как специфического вида деятельности в контексте теории А.Н. Леонтьева “является наиболее полным и целостным его представлением” [11]. И.А. Зимняя рассматривала читателя как активного субъекта, а читательскую деятельность как многоуровневое образование. Нейропсихологический анализ нарушений понимания при очаговых поражениях головного мозга показал, что этот процесс имеет сложную многоуровневую структуру и комплексную мозговую организацию [6], включающую зрительно-пространственную, внутреннеречевую, слухоречевую подсистемы, программирование и

контроль, мотивационную составляющую и вербально-логическое мышление.

Согласно современным моделям понимания при чтении этот процесс включает несколько компонентов: 1) обработку поверхностной структуры текста; 2) обработку макропропозициональной структуры текста; 3) создание логически связной структуры целого текста (*text base*); 4) создание целостной ситуационной ментальной модели текста (*situational model*) [9, 12].

Обработка поверхностной структуры текста обеспечивает генерирование микропропозиций посредством последовательного декодирования слов. Декодирование как умственное действие совершается с помощью операций: конверсии букв в ряд звуков, конверсии ряда звуков в ряд слогов, соотнесения фонетического слова с лексикомом [13]. Полученные микропропозиции посредством умозаключений интегрируются в макропропозиции [2]. Далее читающий формирует связную пропозициональную модель целого текста (*text base*) через объединение созданных ранее макропропозиций с проверкой ее контекстной адекватности и логической связности. Финалом этой совокупности умственных действий является создание целостной ситуационной ментальной модели текста, формируемой на основе взаимодействия личного опыта читателя и информации, эксплицитно и имплицитно представленной в тексте. Создание ситуационной модели сопровождается выдвижением эвристических гипотез о смысле текста как целого [12].

Эффективным методом объективации некоторых из вышеперечисленных процессов является регистрация движений взора посредством айтрекинга — технологии регистрации движений взора в режиме реального времени [14]. Айтрекинг дает возможность получить информацию о траектории перемещения взора в пространстве текста, что релевантно траектории миграции фокуса когнитивной активности читателя [15]. Айтрекер позволяет регистрировать два основных вида движений взора: фиксации — остановки взора на фрагменте текста, и саккады — перемещения взора в разные участки текста. Саккады разделяют на прогрессивные (к еще непрочитанным фрагментам текста) и регрессивные (к ранее прочитанным фрагментам).

Согласно данным исследований [16, 17], фиксации связаны с действиями декодирования: во время фиксации происходит распознавание ряда букв и конверсия их в фонологическое слово. Чем сложнее для читателя этот процесс, тем продолжительнее фиксации и тем большее их число он совершает [18, 19]. Программирование длины прогрессивных саккад зависит от того, насколько велико число знаков, которое читающий распознает симультанно, что влияет и на число фикса-

ций и саккад. С декодированием связаны также и короткие (в пределах слова) регрессивные саккады, отражающие необходимость возврата к части слова для завершения его лексической обработки [17, 20].

Создание макропропозиции часто сопровождается повторным прочтением некоторых фрагментов текста для установления логической адекватности или (в случае обнаружения логической ошибки) для коррекции. Подобный возврат сопровождается перемещением взора — регрессивной саккадой, амплитуда которой не превышает длину макропропозиции (сопоставима с длиной предложения). Связь подобных возвратных движений взора с попытками реинтеграции структур макропропозиций подтверждена в ряде экспериментальных исследований [21, 22].

Создание связной пропозициональной структуры целого текста сопровождается действиями, направленными на оценку контекстной адекватности и логической связности макропропозиций, ее образующих. Успешность протекания данных действий находит отражение в таких параметрах окулomotorного поведения как число длинных регрессивных саккад [21, 23].

Данные литературы и наши исследования [13, 24–26] позволили создать модель читательской деятельности, включающую описание основных этапов и задач чтения, а также связывающую умственные действия и операции с окулomotorными референтами, объективизирующими их анализ (табл. 1).

Известно, что у части детей возникают стойкие затруднения в овладении навыками, составляющими низший уровень обработки текста, т.е. декодирование: автоматизированное и безошибочное чтение и понимание слов (служебных и знаменательных) [13]. Первичные избирательные нарушения такого рода называют дислексией [27, 28].

Под дислексией подразумевают состояние, основным проявлением которого является стойкая, избирательная неспособность овладеть навыком чтения, несмотря на достаточный для этого уровень интеллектуального и речевого/языкового развития, отсутствие нарушений слуха и зрения и оптимальные условия обучения [27].

Немало исследований посвящено анализу механизмов нарушений декодирования — “перевода орфографического слова” в его фонологический эквивалент и последующий лексический доступ, завершающийся пониманием слова. Значительно меньше известно о состоянии понимания читаемого у таких детей. В англоязычной литературе существуют противоречивые данные по этому вопросу [29]. Весьма распространенным является мнение, что трудности понимания при дислексии имеют факультативный характер и зависят от правильности прочтения слов [30]. Но существуют

Таблица 1. Структура читательской деятельности: этапы анализа текста и умственные действия

Этап	Задача	Действие	Операция	Окулоmotorные референты
Обработка поверхностной структуры текста	Генерация микропропозиций	Декодирование	– Рекодирование – Соотнесение фонетического слова с лексиконом – Серийная организация операций	– Количество фиксаций – Продолжительность фиксаций – Количество микро- и коротких регрессивных саккад
Обработка макропропозиционной структуры текста	Генерация макропропозиций	Создание макропропозиции	Синтез микропропозиций на основе вынесения умозаключений	Количество средних регрессивных саккад
Создание связной, когерентной структуры целого текста (<i>text base</i>)	Интеграция макропозиционных структур и контроль их связности	Синтез макропропозиций и проверка их контекстной адекватности и логической связности	Контроль контекстной адекватности и логической корректности выносимых умозаключений	Количество длинных регрессивных саккад
Создание целостной ситуационной ментальной модели текста (<i>situational model</i>)	Создание персональной версии смыслового содержания текста	Выдвижение эвристических гипотез о смысле целого текста посредством интеграции информационной базы текста и личной базы знаний читателя	Извлечение и синтез информации из информационной базы текста и личной базы знаний читателя	Не имеет прямых окулоmotorных референтов

данные, свидетельствующие об обратном. В ряде исследований обнаружено, что при дислексии затруднено понимание фраз и текста [8]. Особенности процесса понимания текстов у русскоязычных детей с дислексией очень слабо изучен. Соответственно, целью настоящего исследования было изучение характеристик движений взора, как референтов умственных действий, совершаемых в процессе чтения письменного текста детьми с дислексией по сравнению со сверстниками с нормой чтения. При анализе полученных данных была предпринята попытка системного анализа деятельности чтения, в рамках которого окулоmotorные феномены рассматриваются в качестве референтов умственных действий и операций, являющихся компонентами этой деятельности. Гипотезой исследования было предположение о том, что у детей с дислексией имеются отличия в системной организации деятельности чтения.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие дети с дислексией 9–11 лет, которых отбирали на основании результатов стандартизированной методики исследования навыка чтения (СМИНЧ) [31].

Решение о включении ребенка в исследование принимали при результате тестирования коэффициента техники чтения (КТЧ) ниже 16 перцентиля и норме интеллектуального развития в соответствии с результатом исследования невербального интеллекта по культурно независимому тесту *R.B. Cattell* [32] (табл. 2). Критериями исключения являлось наличие умственной отсталости, а также слуховых и зрительных нарушений. Контрольную группу составили дети того же возраста с нормой чтения: КТЧ не ниже, чем 95.

Стимульным материалом в айтрекинг исследовании были 2 научных и 2 художественных (повествовательных) текста (табл. 3). Сложность текстов примерно соответствовала возрасту детей, а содержание было малознакомым для них. Экспериментальной задачей было прочитать текст на экране и ответить на вопросы по содержанию. К каждому научному тексту предлагали 5 вопросов, к повествовательному – 10. Время выполнения задачи ограничено не было.

Исследование проводили посредством видеорегистрации движений взора айтрекинг системой *SMI RED500*. Частота работы системы – 500 Гц, монитор для предъявления стимулов – *Dell P2213*. Шрифт текста – Times New Roman, 36 кегль,

Таблица 2. Демографические и психологические характеристики выборки

Группа	Количество детей	Средний класс	Средний возраст	Результат по тесту невербального интеллекта Кеттелла М (SD)
Здоровые дети	42	3–4	9 лет 9 мес.	113.7 (13.1)
Дети с дислексией	32	3–4	9 лет 7 мес.	108.4 (14.2)

Таблица 3. Характеристики текстов-стимулов

Текст	Жанр текста	Количество слов	Средняя длина предложения (слов)	Средняя длина слова (символов)	Относительное количество одно- и двух-сложных слов (%)	Относительное количество трех- и четырех-сложных слов (%)	Средняя частотность слов (<i>ipm</i>)*
Текст 1	Научный	122	13.5	6.3	68	25	256
Текст 2	Научный	109	13.6	5.3	37	41	131
Текст 3	Художественный	128	10.6	5.2	59	33	205
Текст 4	Художественный	139	8.6	4.6	75	22	451

Примечание: * — частотность согласно “новому частотному словарю русской лексики”, где *ipm* — общая частота, характеризующая число употреблений на миллион слов корпуса (*instances per million words*).

межстрочный интервал — 1.5. Демонстрации стимульного материала предшествовала процедура калибровки.

Первичную обработку данных производили с помощью встроенного программного обеспечения айтрекинга системы *BeGaze 2.0*, позволяющей произвести детекцию фиксации и саккад, получить информацию об их количестве, продолжительности и амплитуде. Дальнейшую обработку данных производили посредством дополнительного специализированного программного обеспечения, позволяющего произвести выделение саккад разных амплитуд. В существующих исследованиях регрессивные саккады группируют по величине амплитуды на 3 категории: 1) высоко- и среднеамплитудные, предположительно связанные с трудностями понимания прочитанного [21, 22]; 2) короткие регрессы: а) совершаемые в пределах слова (предположительно связанные с трудностями успешного завершения полной лексической обработки слова) [17, 20]; б) короткие регрессы, возникающие по причине окуломоторной ошибки — в случае, когда фиксация совершается в неудобном для восприятия месте [33, 34].

В силу указанных причин, было предпринято разделение регрессивных саккад на:

1) микрогрессы — регрессивные саккады в пределах 1°, что соответствует 2.6 символа и приблизительно половине средней длины слова в используемых нами текстах;

2) короткие регрессы амплитудой от 1° до 1.9°, соответствующие интервалу от 2.6 до 5.3 символа и длине от половины до целого слова;

3) средние регрессы амплитудой от 1.91° до 5.9°, соответствующие интервалу от 5.3 до 16 символов и длине от 1 до 3 слов;

4) длинные регрессы амплитудой выше 5.9°, выходящие за пределы 3 слов.

Согласно методике, 1° равен 0.37 символа.

Статистический анализ данных производили пакетом *IBM SPSS 22* с использованием статистического теста *One Way ANOVA*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сравнительный анализ качества понимания текстов обнаружил достоверные межгрупповые различия, которые достигали значимого уровня только в текстах № 2 и 3, где процент правильных ответов у детей с дислексией был меньше, чем у здоровых сверстников (табл. 4).

Статистический анализ данных (*ANOVA*) показал, что дети с дислексией отличаются от детей с нормативным навыком чтения по всем исследуемым параметрам движений взора.

Было выявлено, что у детей с дислексией среднее количество фиксаций (в пересчете на одно слово), а также средняя продолжительность фиксаций достоверно больше при чтении как научных, так и повествовательных текстов (табл. 5).

Различия в причинах совершения регрессивных саккад обуславливают малую информатив-

Таблица 4. Количество правильных ответов на вопросы к текстам-стимулам

Показатель	Текст	Группа нормы	Группа детей с дислексией	Достоверность различий	
		M (SD)	M (SD)	F	p
Количество правильных ответов, %	Текст 1	68 (27)	63 (28)	0.549	0.461
	Текст 2	70 (22)	52 (16)	4.670	0.039
	Текст 3	87 (22)	72 (23)	4.025	0.050
	Текст 4	95 (8)	92 (11)	1.205	0.279

Таблица 5. Параметры фиксации при чтении научных и художественных повествовательных текстов здоровыми детьми и детьми с дислексией

Параметр	Группа нормы	Группа детей с дислексией	Достоверность различий	
	M (SD)	M (SD)	F	p
Научные тексты				
Количество фиксаций, шт./слово	3.3 (1.5)	5.3 (2.3)	34.819	0.001
Продолжительность фиксаций, мс	234.9 (58)	333.9 (121)	42.296	0.001
Повествовательные тексты				
Количество фиксаций, шт./слово	2.5 (1)	4.2 (1.9)	45.868	0.001
Продолжительность фиксаций, мс	245.2 (62.1)	335.3 (130.7)	26.811	0.001

ность анализа их среднего количества. В связи с этим был предпринят анализ распределения частоты встречаемости регрессивных саккад разных видов в структуре читательской деятельности (отношение числа саккад каждого вида по отношению к общему числу регрессивных саккад). В результате сравнительного анализа было обнаружено, что дети с дислексией чаще прибегали к микро- и коротким регрессивным и реже — к средним и длинным регрессивным саккадам. При этом данная закономерность наблюдалась при чтении текстов обоих жанров (табл. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Системный анализ окуломоторных характеристик, полученных в настоящем исследовании, в целом подтвердил рабочую гипотезу: организация деятельности анализа текста у детей с дислексией отличается от того, что наблюдается у их здоровых сверстников. Сопоставление основных окуломоторных количественных показателей у детей с дислексией и детей контрольной группы выявило достоверные различия почти по всем показателям. Это согласуется с результатами анало-

Таблица 6. Относительное количество регрессивных саккад разных типов при чтении научных и художественных повествовательных текстов здоровыми детьми и детьми с дислексией

Параметр	Группа нормы	Группа детей с дислексией	Достоверность различий	
	M (SD)	M (SD)	F	p
Научные тексты				
Микрогрессивные саккады, %	20.8 (6.5)	23.6 (5)	6.356	0.013
Короткие регрессивные саккады, %	35.6 (6.9)	39 (5.8)	8.583	0.004
Средние регрессивные саккады, %	29.1 (7.4)	25.3 (5.4)	9.990	0.002
Длинные регрессивные саккады, %	14.5 (5.5)	12 (5.5)	6.045	0.015
Повествовательные тексты				
Микрогрессивные саккады, %	19.6 (6.2)	24.7 (5.6)	22.277	0.001
Короткие регрессивные саккады, %	35.6 (6.1)	39.6 (5.3)	14.487	0.001
Средние регрессивные саккады, %	29.1 (7.2)	23.8 (5.5)	20.354	0.001
Длинные регрессивные саккады, %	15.7 (5.5)	11.9 (4.7)	15.310	0.001

гичных исследований, выполненных на другом языковом материале [16, 35]. Это касается числа и продолжительности фиксации и саккад, сопровождающих действия декодирования, значение которых было значительно выше у детей с дислексией. Специального внимания заслуживает тот факт, что эти отличия одновременно свидетельствуют о повышенной трудоемкости процесса чтения для таких детей, что в условиях дефицита когнитивных ресурсов, характеризующего состояние дислексии [13, 27, 28, 36, 37], по-видимому, негативно сказывается на качестве понимания прочитанного. Худший уровень понимания у детей с дислексией выявился лишь в наиболее сложных по лингвостатистическим показателям текстов № 2 и 3. Эти тексты имели более низкий уровень частотности слов и большую относительно частоту многосложных слов.

Новыми являются полученные данные о распределении регрессивных саккад с разной амплитудой. Межгрупповые различия носили зеркальный характер в зависимости от протяженности регрессивных саккад. Если в количестве микро- и коротких саккад дети с дислексией превосходили благополучных сверстников, то средние и длинные регрессы они совершали достоверно реже.

Средние и длинные регрессивные саккады, как известно, являются окулomotorными референтами умственных действий, связанных со смысловым анализом текста, его пониманием [22]. Основываясь на данных литературы и наших исследованиях, можно предположить, что меньшая частота средних и длинных регрессивных саккад у детей с дислексией отражает меньшее количество действий и операций, связанных с генерацией макропропозиций и проверкой выносимых умозаключений, а также действий, направленных на проверку связности построенной модели текста. Окулomotorные свидетельства повышенных энергозатрат при чтении позволяют предположить, что это может служить дополнительным препятствием в выполнении умственных и окулomotorных действий на макроуровне в условиях когнитивного ресурсного дефицита [8, 38]. В условиях параллельно выполняемых операций, которые находятся в конкурентных отношениях борьбы за ресурсы, перегрузка в одном из звеньев функциональной системы может вызвать функциональный дефицит в другом [39].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Среди всех трудностей, наблюдающихся у детей с дислексией, наиболее тяжелым и стойким является неполноценность навыков декодирования. Однако, как показало исследование, кроме этого, у детей с дислексией существует функциональная недостаточность в организации деятельности анализа текста. Данные регистрации дви-

жений взора и анализа распределения регрессивных саккад косвенно свидетельствуют о том, что у детей ограничены возможности выполнения высших форм интеграции макропропозиций и мониторинга связности. Системный анализ процесса окулomotorного поведения с позиций теории деятельности представляется перспективным направлением изучения читательской деятельности в норме и при патологии.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета Минздрава России (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Родители детей — участников исследования представили добровольное письменное информированное согласие, подписанное ими после разъяснения им потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование поддержано РФФИ (грант № 19-29-14078).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леонтьев А.А. Язык и речевая деятельность в общей и педагогической психологии. М.: Изд-во Московского психолого-социального института, 2001. 444 с.
2. Kintsch W. The role of knowledge in discourse comprehension construction-integration model // Psychol. Rev. 1988. V. 95. № 2. P. 163.
3. Kendeou P., van den Broek P., Helder A., Karlsson J. A cognitive view of reading comprehension: Implications for reading difficulties // Learn. Disabil. Res. Pract. 2014. V. 29. № 1. P. 10.
4. Silva M., Cain K. The relations between lower and higher level comprehension skills and their role in prediction of early reading comprehension // J. Educ. Psychol. 2015. V. 107. № 2. P. 321.
5. Залевская А.А. Психолингвистические исследования. Слово. Текст. М.: Гнозис, 2005. 543 с.
6. Цветкова Л.С. Нейропсихология и афазия: новый подход. М.: Московский психолого-социальный институт, 2001. С. 359.
7. Keenan J.M., Meenan C.E. Test differences in diagnosing reading comprehension deficits // J. Learn. Disabil. 2014. V. 47. № 2. P. 125.
8. Georgiou G.K., Martinez D., Vieira A.P. et al. A meta-analytic review of comprehension deficits in students with dyslexia // Ann. Dyslexia. 2022. V. 72. № 2. P. 204.

9. Graesser A.C., McNamara D.S., Louwerse M.M. What do readers need to learn in order to process coherence relations in narrative and expository text / Rethinking reading comprehension. New York, N.Y.: Guilford Publications, 2003. P. 82.
10. Леонтьев А.Н. Деятельность. Сознание. Личность. М.: Политиздат, 1975. 303 с.
11. Зимняя И.А. Лингвопсихология речевой деятельности: Избр. психол. Труды. М.: Изд-во Московского психолого-социального института, 2001. С. 119.
12. van Dijk T.A., Kintch W. Strategies of discourse comprehension. N.Y.: Academic Press, 1983. P. 336.
13. Корнев А.Н. Поэтапное формирование оперативных единиц письма и чтения как базовый алгоритм усвоения этих навыков / Нарушения письма и чтения у детей: изучение и коррекция. М.: Логомаг, 2018. С. 5.
14. Ярбус А.Л. Роль движений глаз в процессе зрения. М.: Наука, 1965. 166 с.
15. Just M.A., Carpenter P.A. A theory of reading: from eye fixations to comprehension // Psychol. Rev. 1980. V. 87. № 4. P. 329.
16. Hyönä J., Olson R.K. Eye fixation patterns among dyslexic and normal readers: effects of word length and word frequency // J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn. 1995. V. 21. № 6. P. 1430.
17. Pollatsek A., Rayner K. Eye movements and lexical access in reading / Comprehension processes in reading // Ed. Coltheart M. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1990. P. 43.
18. Daneman M., Reingold E. What eye fixations tell us about phonological recoding during reading // Can. J. Exp. Psychol. 1993. V. 47. № 2. P. 153.
19. Inhoff A.W., Topolski R. Use of phonological codes during eye fixations in reading and in on-line and delayed naming tasks // J. Mem. Lang. 1994. V. 33. № 5. P. 689.
20. Pynte J. Lexical control of within-word eye movements // J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform. 1996. V. 22. № 4. P. 958.
21. Hyönä J. An eye movement analysis of topic-shift effect during repeated reading // J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn. 1995. V. 21. № 5. P. 1365.
22. Vitu F., McConkie G.W., Zola D. About regressive saccades in reading and their relation to word identification / Eye guidance in reading and scene perception. Elsevier Science Ltd., 1998. P. 101.
23. Inhoff A.W., Kim A., Radach R. Regressions during reading // Vision. 2019. V. 3. № 3. P. 35.
24. Корнев А.Н., Оганов С.Р., Гальперина Е.И. Формирование психофизиологических механизмов понимания письменных текстов: регистрация движений взора при чтении у детей с дислексией 9–11 и 12–13 лет и здоровых сверстников // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 3. С. 24.
Kornev A.N., Oganov S.R., Galperina E.I. Development of the psychophysiological mechanisms in the comprehension of printed texts: eye tracking during text reading in healthy and dyslexic children aged 9–11 and 12–14 years // Human Physiology. 2019. V. 45. № 3. P. 249.
25. Оганов С.Р., Корнев А.Н. Окуломоторные характеристики как показатель сформированности навыка анализа письменного текста у детей 9–11 и 12–14 лет // Специальное образование. 2017. Т. 47. № 3. С. 112.
26. Оганов С.Р., Корнев А.Н. Читательская деятельность у детей с дислексией: движения взора как умственные действия / ПРОчтение: дислексия в XXI в. М.: Гос. ИРЯ им. А.С. Пушкина, 2020. С. 162.
27. Корнев А.Н. Нарушения чтения и письма у детей. СПб.: Речь, 2003. 330 с.
28. Miciak J., Fletcher J.M. The critical role of instructional response for identifying dyslexia and other learning disabilities // J. Learn. Disabil. 2020. V. 53. № 5. P. 343.
29. Cutting L.E., Clements-Stephens A., Pugh K.R. et al. Not all reading disabilities are dyslexia: distinct neurobiology of specific comprehension deficits // Brain Connect. 2013. V. 3. № 2. P. 199.
30. Gough P.B., Tunmer W.E. Decoding, reading, and reading disability // Remedial Spec. Educ. 1986. V. 7. № 1. P. 6.
31. Корнев А.Н., Ишимова О.А. Методика диагностики дислексии у детей. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2010. 70 с.
32. Cattell R.B. Culture fair intelligence test // J. Educ. Psychol. 1973. P. 176.
33. Безруких М.М., Иванов В.В. Движения глаз в процессе чтения как показатель сформированности навыка // Физиология человека. 2013. Т. 39. № 1. С. 83.
Bezrukikh M.M., Ivanov V.V. Eye movements in the process of reading as an indicator of development of reading skill // Human Physiology. 2013. V. 39. № 1. P. 68.
34. O'Regan J.K. Eye movement strategy and tactics in word recognition and reading / Attention and performance XII: The psychology of reading. London: Routledge, 1987. P. 363.
35. Hutzler F., Wimmer H. Eye movements of dyslexic children when reading in a regular orthography // Brain Lang. 2004. V. 89. № 1. P. 235.
36. Frith U. Resolving the paradoxes of dyslexia / Dyslexia and Literacy. Theory and Practice. Chichester (West Sussex): Wiley, Cop, 2002. P. 69.
37. McGrath L.M., Peterson R.L., Pennington B.F. The multiple deficit model: Progress, problems, and prospects // Sci. Stud. Read. 2020. V. 24. № 1. P. 7.
38. Kibby M.Y., Marks W., Morgan S., Long C.J. Specific impairment in developmental reading disabilities: A working memory approach // J. Learn. Disabil. 2004. V. 37. № 4. P. 349.
39. Rapp D.N., Broek P.V.D., McMaster K.L. et al. Higher-order comprehension processes in struggling readers: A perspective for research and intervention // Sci. Stud. Read. 2007. V. 11. № 4. P. 289.

Oculomotor Referents of Reading Activity in Children with Dyslexia Aged 9–11**S. R. Oganov^{a, *}, A. N. Kornev^a***^aSaint-Petersburg State Pediatric Medical University Ministry of Health Care of the Russian Federation,
St. Petersburg, Russia***E-mail: oganov.s.r@gmail.com*

The problem of printed text processing impairments in dyslexics is of current interest but not well developed. The integration of the activity approach and eye-tracking methods provides us the opportunity to manage the system structural and functional analysis the reading as an complex activity. The purpose of the present study was to examine the oculomotor behavior as referent of mental actions performed in the process of reading a written text by children with dyslexia. The study of the oculomotor behavior during a text reading in 9–11 year children with dyslexia was carried out. An eye movements during the text reading were recorded by means of eye-tracker. All participants were presented two kinds of texts: two expository texts and two narrative texts. The fixation's number and duration and regressive saccade number and duration was registered; the distribution of regressive saccade with different amplitudes (very short, short, medium and long) were analyzed. Statistical analysis of data revealed the significant between group distinctions in all gaze movements measures. These data proved that children with dyslexia have reading activity disfunction both on the lexical and propositional and semantic levels.

Keywords: dyslexia, text comprehension, oculomotor behavior, children.

ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ РЕЧЕВОЙ СИСТЕМЫ И ИХ СВЯЗЬ С СОСТОЯНИЕМ УПРАВЛЯЮЩИХ ФУНКЦИЙ МОЗГА У СТАРШИХ ДОШКОЛЬНИКОВ

© 2023 г. М. Н. Захарова^{1, 2, 3, *}, А. Р. Агрис^{2, 3, 4}

¹ФГБНУ Институт возрастной физиологии РАО, Москва, Россия

²Многопрофильный психологический центр “Территория Счастья”, Москва, Россия

³ЧОУ ДПО “Институт возрастной нейропсихологии”, Москва, Россия

⁴Институт общественных наук ФГБОУ ВО Российская академия народного хозяйства и государственной службы, Москва, Россия

*E-mail: zmn@idnps.ru

Поступила в редакцию 17.11.2022 г.

После доработки 21.01.2023 г.

Принята к публикации 31.01.2023 г.

Управляющие функции мозга (УФ) играют очень важную роль в различных аспектах развития ребенка, осуществляя контроль когнитивных процессов и поведения. Развитие речи также является одной из важнейших задач дошкольного детства и важным предиктором успешности обучения в школе. Как классические, так и современные исследования подчеркивают наличие связи между этими функциями. С целью исследования данной связи было проведено сравнительное нейропсихологическое исследование детей 5–6 ($n = 61$, средний возраст $- 5.67 \pm 0.33$ лет) и 6–7 лет ($n = 117$, средний возраст $- 6.67 \pm 0.29$ лет) с дополнительной оценкой речевой функции и ее компонентов (фонематическое восприятие, слухоречевая память, серийная организация моторной программы, лексический и грамматический уровни, планирование высказывания). Были обнаружены *возрастные* различия по ряду параметров: объем слухоречевой памяти ($p \leq 0.002$), лексическое ($p = 0.031$) и грамматическое ($p = 0.008$) оформление речи, планирование высказывания ($p < 0.001$), понимание логико-грамматических конструкций ($p < 0.001$). Связь речевой системы с уровнем развития УФ нарастает с возрастом от 5–6 к 6–7 годам и особенно заметна для различных сторон связной речи (планирование высказывания, его грамматическое и в меньшей степени – лексическое оформление), слухоречевой памяти и вербально-логического мышления; для процессов фонематического восприятия, серийной организации моторной программы и понимания логико-грамматических конструкций эта связь выражена меньше и касается только отдельных показателей, но также присутствует. Данные исследования могут использоваться для эффективного планирования программы развития и коррекции речи в старшем дошкольном возрасте с опорой на формирование процессов произвольной регуляции, а также для развития процессов планирования и контроля с учетом необходимости работы при этом также и с различными компонентами речевой системы.

Ключевые слова: управляющие функции мозга, рабочая память, тормозный контроль, когнитивная гибкость, дошкольный возраст, нейропсихология, речь, фонематическое восприятие, слухоречевая память, серийная организация речи, лексика, грамматика, планирование высказывания.

DOI: 10.31857/S0131164622600914, **EDN:** GBNKMC

Управляющие функции (УФ) или, в отечественной терминологии – функции планирования, избирательной регуляции и контроля деятельности [1, 2], – процессы, являющиеся нейрокогнитивной базой произвольной целенаправленной регуляции человеком собственной активности и поведения. В составе УФ выделяют такие компоненты, как рабочая память (РП), подавление импульсивных или привычных действий и переключение между когнитивными задачами – когнитивная гибкость [3, 4]. Мозговой основой УФ

является высокоуровневая фронто-цингуло-париетальная сеть, т.е. сложные нейронные ансамбли различных кортикальных и субкортикальных отделов [5, 6]. Состояние УФ значимо связано с ключевыми показателями когнитивного, социального и психического развития [3] и с успешностью школьного обучения, являясь предиктором этих успехов у дошкольников [7, 8]. В этой связи актуальными становятся вопросы о том, какие факторы и процессы влияют на формирование УФ

в онтогенезе, а также каковы особенности структуры УФ в различных возрастах.

Развитие УФ протекает длительно и сложно. В нем созревание обеспечивающих эти процессы мозговых структур тесно переплетено с влиянием получаемого ребенком опыта, без которого невозможно формирование мозговых механизмов УФ. Отдельные исследования демонстрируют улучшение с возрастом всех трех компонентов УФ (торможения, РП и переключения), несмотря на различия в траектории их развития [9]. Один из скачков в этом процессе происходит в дошкольном возрасте [10, 11]. От нормативной непосредственности и спонтанности младшего дошкольника поведение ребенка при этом движется к контролируемому и спланированному сначала за счет помощи взрослых, а потом и усилиями самого ребенка в старшем дошкольном возрасте. В культурно-деятельностном отечественном подходе к развитию ключевой для этого функцией считается речь — согласно Л.С. Выготскому [12], она представляет собой инструмент опосредования (опосредствования) высших психических функций (ВПФ), т.е. средство (“психическое оружие”), с помощью которого работа ВПФ становится произвольно регулируемой внешними для ребенка или уже его собственными командами и инструкциями. В этом же подходе, разделяемом и отечественными нейропсихологами, речь рассматривается как сложная функциональная система, состоящая из многих компонентов, каждый из которых связывается в том числе с работой определенных мозговых механизмов [13]. В этой связи для современных нейрокогнитивных исследований актуальным является вопрос рассмотрения степени связи уровня зрелости УФ и различных компонентов речевой системы в старшем дошкольном возрасте. Так, в обзоре А. Shokrkon и E. Nicoladis [14] описывается три возможных направления связи между УФ и развитием речи на протяжении детства:

1) влияние УФ на функционирование речи (сосредоточение на релевантной информации с игнорированием нерелевантной, удержание внимания на используемой взрослым лексике и синтаксисе для их запоминания, возможность быть более гибким при применении вариативных языковых правил или исключений из них (например, правильного употребления омонимов в определенном контексте), обогащение словаря благодаря эффективной РП и развитию тормозного контроля),

2) влияние речи на развитие УФ (речевая регуляция важна для отслеживания инструкций, постановки и удержания как текущей цели, так и последовательности действий, язык необходим для формирования и использования структуры

правил, регулирующих наше поведение и осуществляемые нами выборы),

3) взаимовлияние УФ и речи друг на друга (способность понимать более сложные с точки зрения лексического и грамматического оформления речевые конструкции позволяет детям действовать РП, когнитивную гибкость и тормозный контроль для регуляции своего поведения, а последние влияют на возможность удержания и контроля не только своих действий, но и мыслей, в том числе внутренней речи).

Целью данного исследования стало описание различий в состоянии ряда компонентов речевой системы (фонематическое восприятие, слухоречевая память, серийная организация моторной программы, лексический и грамматический уровни организации речи, планирование связного речевого высказывания, понимание логико-грамматических конструкций) у старших дошкольников в зависимости от сформированности у них УФ, или процессов планирования, избирательной регуляции и контроля деятельности.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 178 дошкольников обоих полов (87 мальчиков и 91 девочка), посещавших дошкольные образовательные учреждения. Вся выборка была разделена на две возрастные группы: 1) дети 6–7 лет (средний возраст — 6 лет 8 мес. $\pm$ 3.5 мес.), посещавшие подготовительную группу ($n = 117$, 58 мальчиков, 59 девочек), и 5–6 лет (средний возраст — 5 лет 8 мес. $\pm$ 4 мес.), посещавшие старшую группу детского сада ($n = 61$, 29 мальчиков, 32 девочки).

Для оценки **сформированности УФ** использовали *фронтальное* исследование, которое включало в себя следующие тесты:

— *Реакция выбора*: проба направлена на оценку возможностей следования речевой инструкции, подавления непосредственных реакций, переключения между программами.

— *Графомоторная проба* направлена на исследование возможностей усвоения и удержания двигательной программы при графическом предъявлении образца, переключения с одного элемента программы на другой.

— Проба “*Нахождение различий*” позволяет оценить избирательное зрительное внимание, возможности его распределения и переключения с одного изображения на другое.

— *Корректурная проба* направлена на анализ способности удержания внимания на монотонной задаче, распределения внимания на поиск сразу двух стимулов и переключения с одного правила на другое.

— Проба “*Зоопарк*” позволяет оценить эффективность зрительно-пространственной РП.

– Проба “*Следование по маршруту*” направлена на анализ возможностей удержания программы, планирования следующего действия, подавления непосредственных реакций.

– Проба “*Лабиринты*” направлена на оценку возможностей формирования стратегии деятельности и подавления непосредственных реакций.

– Проба “*Шифровка*” позволяет исследовать эффективность произвольного внимания, включая его избирательность, возможности переключения и длительного удержания в ходе выполнения монотонного задания.

– Проба “*Копирование трехмерного изображения*” (рисунок “Дом, дерево, забор”) позволяет оценить возможности планирования и создания стратегии копирования с опорой на аналитические и целостные компоненты восприятия.

Часть описанных проб используется при групповой нейропсихологической диагностике [15], часть была взята из методики традиционного нейропсихологического обследования детей [16], отдельные пробы были разработаны специально для данного исследования, однако их аналоги с успехом используются в коррекционно-развивающем обучении. Фронтальную диагностику проводил один специалист в группе 5–12 чел. с участием 2–3 ассистентов, которые оказывали индивидуальную помощь детям с трудностями усвоения инструкций и фиксировали различные поведенческие проявления в виде импульсивности или эмоциональных реакций, неадекватных ситуации обследования. Оценка результатов выполнения нейропсихологических проб проводили по схеме, позволяющей наиболее полно реализовать цель исследования и предложенной О.А. Семеновой [17, 18], на основе которой было выделено четыре интегральных показателя:

– дефицит функций программирования (среднее показателей трудностей усвоения инструкций/алгоритмов и создания стратегии деятельности),

– дефицит избирательной регуляции (среднее показателей трудностей преодоления импульсивных (непосредственных) реакций, переключения с одного действия на другое, переключения с одной программы на другую, трудностей устойчивого поддержания усвоенной программы),

– дефицит произвольного контроля собственной деятельности,

– общий показатель дефицита УФ (среднее показателей дефицитов программирования, избирательной регуляции и контроля).

Для оценки состояния **речевой функции** проводили индивидуальное обследование, которое включало следующие задания:

– Проба “*Запоминание 2 групп по 3 слова*” направлена на оценку фонематического восприя-

тия, возможностей звукопроизношения, а также непроизвольного и произвольного запоминания.

– Проба “*Составление рассказа по серии сюжетных картинок*” (на материале картинок Н. Радлова “Кошка и кактус”) позволяет оценить возможности ориентировки в ситуации и ее осмысления, планирования связного речевого высказывания, грамматическое и лексическое оформление высказываний.

– Проба “*Скороговорки*” (повторение четырех скороговорок, отличающихся количеством слов и звуковым составом) направлена на анализ особенностей звукопроизношения, возможностей переключения (со звука на звук, со слога на слог, со слова на слово) и запоминания.

– Проба “*Понимание логико-грамматических конструкций*” позволяет исследовать понимание активных и пассивных конструкций с прямым и обратным порядком слов.

Большая часть параметров оценки нейропсихологических проб, вошедших в интегральные показатели несформированности тех или иных компонентов, представляет собой систему штрафных баллов: минимальная оценка соответствует наилучшему выполнению, а максимальная – наихудшему. При оценке речевой функции часть оценок также являлись штрафными баллами, а часть – были показателями продуктивности. При обработке данных использовали пакет статистических программ SPSS 28.0. Для оценки значимости возрастных изменений анализируемых нейропсихологических показателей применяли непараметрический критерий Манна–Уитни (U), для оценки корреляционных связей – коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Возрастные изменения эффективности **слухоречевой памяти** были обнаружены при анализе всех воспроизведений, кроме отсроченного, где изменения носили лишь характер тенденций (табл. 1). При этом дети обеих групп допускали разнообразные ошибки по типу изменений одного согласного (клин–“клин”, “крин”) или гласного звука (рама–“рома”), искажения слова (замены 2 и более звуков: холод–“хлама”), замены слова на близкое по звучанию (клин–“клен”, гость–“кость”) или значению (гость–“друг”, холод–“мороз”), однако значимые различия между группами были выявлены лишь в отношении ошибок по типу пропусков слов ($U = 2563.0$, $p = 0.002$) и вpletений ($U = 2313.0$, $p = 0.003$), которые чаще делали дошкольники 5–6 лет.

Продуктивность практически всех видов воспроизведений оказалась связана с показателем дефицита УФ – исключение составил в возрасте 5–6 лет параметр первого воспроизведения (дан-

Таблица 1. Продуктивность воспроизведения слов при запоминании двух групп по три слова

Параметр	Группа	Минимум	Максимум	Среднее значение	Стандартное отклонение	Корреляции с показателем дефицита УФ	Межгрупповые различия
1 воспроизведение	5–6	0	5	1.84	1.19	$r = -0.260, p = 0.007$	$U = 2270.0$
	6–7	0	6	2.41	1.17		$p = 0.002$
2 воспроизведение	5–6	0	6	2.97	1.42	$r = -0.290, p = 0.027$	$U = 2304.5$
	6–7	0	6	3.80	1.56	$r = -0.229, p = 0.018$	$p = 0.002$
3 воспроизведение	5–6	0	6	3.32	1.61	$r = -0.327, p = 0.012$	$U = 2269.0$
	6–7	1	6	4.19	1.43	$r = -0.352, p < 0.001$	$p = 0.001$
Отсроченное воспроизведение	5–6	0	6	3.32	1.61	$r = -0.396, p = 0.003$	$U = 2701.5$
	6–7	0	6	3.29	1.61		$p = 0.088$

ный параметр оценивает продуктивность непроизвольного запоминания, т.к. ребенку не давалась задача запомнить слова, а лишь повторить, инструкция вспомнить все повторенные им слова оказывалась неожиданной для детей), а в возрасте 6–7 лет – отсроченного (где требуется вспомнить слова после интерферирующего воздействия в виде задания на порядковый и избирательный счет). Более подробный анализ корреляционных связей не только интегрального показателя дефицита УФ, но и входящих в его состав показателей трудностей программирования, избирательной регуляции и контроля позволил обнаружить взаимосвязь продуктивности первого воспроизведения в возрасте 5–6 лет с трудностями контроля ($r = -0.338, p = 0.010$), а в возрасте 6–7 лет с трудностями программирования ($r = -0.213, p = 0.028$) и избирательной регуляции ($r = -0.246, p = 0.011$). Продуктивность отсроченного воспроизведения оказалась связанной в 5–6 лет со всеми компонентами дефицита УФ – трудностями программирования ($r = -0.396, p = 0.002$), избирательной регуляции ($r = -0.370, p = 0.004$) и контроля ($r = -0.290, p = 0.027$), а в 6–7 лет – с трудностями программирования ($r = -0.200, p = 0.040$) и избирательной регуляции ($r = -0.196, p = 0.044$). На увеличение объема запоминаемого на слух материала с возрастом указывает и возможность более старших детей продуктивнее повторять (давалось от 1 до 3 попыток) наиболее длинную скороговорку ($U = 2091.0, p = 0.044$), состоящую из 9 слов: в возрасте 6–7 лет 24.6% детей справились с этим заданием, а в 5–6 лет только 9.3%, причем с интегральным показателем дефицита УФ данный параметр оказался связанным лишь в старшей возрастной группе ($r = -0.252, p = 0.007$).

Оценка **фонематического восприятия** осуществлялась на основе анализа трех продуктивностей повторения двух групп по три слова. В каждом повторении дети из обеих групп называли около 5 слов (в среднем от 4.8 до 5.3) и не различались

статистически ни по параметрам продуктивности, ни по количеству ошибок (изменения одного согласного или гласного, искажения слов), что позволяет предположить отсутствие настолько же значимой динамики в развитии фонематического восприятия на данном возрастном этапе, какая свойственна для описанной выше слухоречевой памяти. Важно отметить, что интегральный показатель дефицита УФ оказался связанным с продуктивностью первого ($r = -0.254, p = 0.009$), второго ($r = -0.218, p = 0.026$) и третьего ($r = -0.198, p = 0.042$) повторения лишь в возрасте 6–7 лет. В то же время в пробе на повторение скороговорок отмечались межгрупповые различия в отношении количества ошибок по типу изменения одного согласного звука ($U = 1673.0, p = 0.027$) и искажения (множественных изменений) звукового состава слов ($U = 1599.0, p = 0.025$), которые чаще встречались в группе детей 5–6 лет. Потенциально такие ошибки могут быть связаны с трудностями фонематического восприятия, но в ряде случаев могут идти и от проблем серийной организации движений (из-за которых звуковая структура может меняться по причине, к примеру, упрощения или повторов элементов моторной программы; более подробно об этом компоненте речевой системы см. далее); кроме того, некоторые ошибки замены звуков могут быть обусловлены и ошибками звукопроизношения (в том числе замена звуков, близких по способу произношения, что может указывать на слабость переработки кинестетической информации от органов артикуляционного аппарата). Данные типы ошибок связи с показателями УФ не обнаружили.

Продолжая анализ выполнения детьми пробы на повторение скороговорок, важно отметить возрастные изменения **серийной организации моторной составляющей устной речи** (плавности переключения от одного компонента моторной программы (звука, слога, слова) к другому): при



Рис. 1. Возможности планирования рассказа у старших дошкольников.

повторении скороговорок дети 5–6 лет делали значимо больше ошибок антиципаций ($U = 1165.5, p < 0.001$), персевераций ($U = 425.5, p < 0.001$), пропусков звуков ($U = 1146.0, p < 0.001$), перестановок звуков ($U = 1850.0, p = 0.039$) и слогов ($U = 1593.5, p = 0.004$), которые чаще инертно повторялись от воспроизведения к воспроизведению ($U = 1386.0, p < 0.001$). Связь с общим уровнем развития УФ состояния серийной организации моторной программы речевого высказывания оказалась наименьшей — она показана для продуктивности в 3 субтесте (в 6–7 лет: $r = -0.253, p = 0.007$; в 5–6 лет: $r = -0.520, p < 0.001$), состоящем из 5 слов и включающем слова с шипящими и свистящими звуками, и для ошибок по типу искажений звукового состава слов и замен согласных.

При составлении рассказа по серии картинок от 5–6 к 6–7 годам значимо улучшались возможности **планирования** рассказа ($U = 1493, p < 0.001$): 13.2% детей старшей возрастной группы составили законченный рассказ с точной и правильной последовательностью основных смысловых единиц и наличием связующих звеньев, а 49.1% пропускали лишь отдельные смысловые единицы или связующие звенья, могли делать необоснованные повторы связующих слов; в возрасте 5–6 лет большая часть детей (60.4%) пропускала целые смысловые звенья в рассказе, допускала смысловые повторы и даже разрывы в повествовании (рис. 1). При этом способности к последовательному планированию рассказа оказались связанными с отдельными параметрами компонента избирательной регуляции, причем если в 5–6 лет это была возможность устойчивого поддержания программы деятельности ($r = 0.338, p = 0.035$), то в 6–7 лет — и устойчивое поддержание программ ($r = 0.196, p = 0.037$), и возможность переключения с программы на программу ($r = 0.195, p = 0.039$).

Возрастные изменения отмечались и в отношении **грамматического оформления** рассказа ($U = 1675, p = 0.008$):

- 21.9% детей 6–7 лет и лишь 10.7% детей 5–6 лет строили грамматически правильно оформленный рассказ с использованием разнообразных грамматических конструкций;

- у 44.6% детей 6–7 лет и 37.6% детей 5–6 лет отмечались короткие предложения и/или однообразие синтаксических структур или нарушения порядка слов при грамматически правильном оформлении рассказа;

- единичные аграмматизмы и использование исключительно коротких предложений было отмечено у 30.7% младших дошкольников и у 37.6% — старших (увеличение средней длины фразы с возрастом ($U = 1488.0, p = 0.037$) оценивалось отдельно);

- наконец, множественные синтаксические ошибки (в том числе пропуск глагольного сказуемого) отмечались лишь у 2.8% детей 6–7 лет и 14.1% детей 5–6 лет.

Грамматическое оформление рассказа в 5–6 лет оказалось связанным с возможностью усвоения программ ($r = 0.342, p = 0.033$), а в 6–7 лет — с возможностью переключаться с программы на программу ($r = 0.220, p = 0.029$), устойчиво удерживать усвоенную программу ($r = 0.217, p = 0.021$) и контролем за своей деятельностью и ее результатами ($r = 0.226, p = 0.016$).

Параметр **лексического оформления** рассказа (рис. 2) также продемонстрировал изменения при переходе от 5–6 к 6–7 годам ($U = 1796.5, p = 0.031$), что выражалось в адекватном использовании третьей детей старшей возрастной группы (35.9%) лексических средств при составлении рассказа по сюжетным картинкам, либо в 43% случаев поиском слов или единичными близкими вербальными заменами. Интересно отметить, что

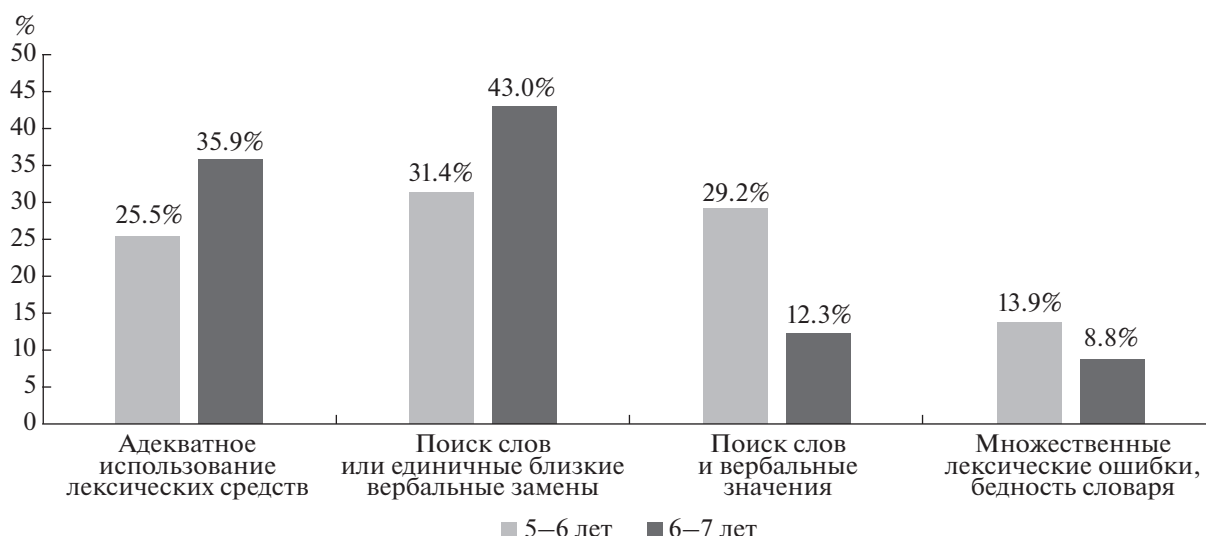


Рис. 2. Возможности лексического оформления рассказа у старших дошкольников.

лексическое оформление рассказа в 5–6 лет оказалось связано лишь с отдельными параметрами УФ (способностью усваивать инструкции и алгоритмы деятельности ($r = 0.402$, $p = 0.011$), переключаться с действие на действие ($r = 0.346$, $p = 0.031$) и с программы на программу ($r = 0.379$, $p = 0.017$)), а в 6–7 лет – с интегральными показателями программирования ($r = 0.295$, $p = 0.002$), избирательной регуляции ($r = 0.199$, $p = 0.035$) и контроля ($r = 0.211$, $p = 0.025$).

Задание на составление рассказа по серии сюжетных картинок позволило продемонстрировать и положительную динамику в сфере мышления: более старшие дети лучше понимали смысл случившегося ($U = 1614.5$, $p = 0.005$) и более полно излагали его в рассказе ($U = 1689.0$, $p = 0.010$), реже показывали искажения в его интерпретации ($U = 1697.5$, $p = 0.011$). При этом в 5–6 лет была обнаружена лишь связь показателя понимания смысла с контролем за деятельностью ($r = 0.383$, $p = 0.016$), а в 6–7 лет понимание смысла оказалось связано как с интегральным показателем состояния УФ ($r = 0.276$, $p = 0.003$), так и с входящим в его состав показателем избирательной регуляции ($r = 0.285$, $p = 0.002$), тогда как искажения в интерпретации событий – с избирательной регуляцией ($r = 0.227$, $p = 0.016$).

Точность понимания логико-грамматических конструкций увеличивалась с возрастом ($U = 1239.5$, $p < 0.001$), при этом наибольшие различия касались понимания активных ($U = 1283$, $p < 0.001$) и пассивных ($U = 1504$, $p = 0.017$) конструкций с обратным порядком слов. Интересно отметить, что корреляционные связи всех трех показателей были обнаружены лишь для возраста 6–7 лет и лишь для показателя трудностей переключения с программы на программу (с точностью понимания

($r = -0.294$, $p < 0.001$); с ошибками понимания активных ($r = 0.232$, $p = 0.010$) и пассивных ($r = 0.204$, $p = 0.024$) конструкций).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные в исследовании результаты можно проанализировать в двух направлениях – возрастной динамики исследуемых компонентов речевой системы и связи этих компонентов с развитием УФ в двух разных возрастных группах. Значимые **возрастные изменения** можно проследить практически у всех сторон речи старших дошкольников. От 5–6 к 6–7 годам у детей заметно растет объем **слухоречевой памяти** (связанной с работой височных отделов коры больших полушарий [1, 13]) с уменьшением при запоминании числа грубых ошибок (пропусков и вpletений), что видно и по заучиванию отдельных слов (по объему первого непосредственного и двух последующих произвольно регулируемых воспроизведений слов), и по запоминанию фраз-скаороговорок (по повышению продуктивности повторения самой длинной скаороговороки в 6–7 лет) – таким образом, у детей не просто увеличивается объем механической памяти, но и растут возможности работать с семантически организованным материалом. Улучшаются показатели связной речи: растет качество **планирования высказывания** (рассказ становится более последовательным и полным, снижается число пропусков и повторов смысловых звеньев) и его **грамматико-синтаксического оформления** (предложения становятся более длинными и развернутыми, разнообразными по структуре, уменьшается число аграмматизмов). Важно отметить, что планирование и грамматическое оформление связаны с точки зрения

нейролингвистики [13] с работой передних (лобных) отделов коры, которые входят и в систему мозгового обеспечения управляющих функций [1, 5, 6]. **Лексическое оформление** своего высказывания (связанное уже с задними отделами коры — с височно-затылочной областью [13]) также улучшается в этот период — в 6–7 лет дети успешнее выбирают адекватные лексические средства, делают меньше ошибочных подборов слов, реже демонстрируют поиск слов. Важно, что такой связанный с речью и порой даже тяжело отделимый от нее в диагностических процедурах процесс, как **вербально-логическое мышление**, также показывает в этот возрастной период положительную динамику: более старшие дети лучше понимают смысл рассказа, более полно передают его в своей речи и меньше допускают ошибок по типу искажения смысла. В звене **серийной организации моторной программы** (с мозговой точки зрения оно обеспечивается работой заднелобных отделов [1, 13]) также отмечаются прогрессивные изменения, за счет которых уменьшается число разнообразных ошибок (антиципаций, персевераций, пропусков, перестановок звуков и слогов и их инертных повторов) в сложных с моторной точки зрения фразах-скороговорках. Улучшается от 5–6 к 6–7 годам и понимание **логико-грамматических конструкций** (особенно это заметно по конструкциям с активным и пассивным залогом с обратным порядком слов¹, нетипичным для устной разговорной речи), требующее достаточной зрелости квазипространственных представлений и работы теменно-височно-затылочных отделов коры [13]. Исключение составляет **фонематическое восприятие**, связанное с височной корковой областью [1]: в нем возрастные изменения можно проследить только по снижению числа ошибок по типу искажений звукового состава слов и замен согласных в скороговорках, причем, как уже отмечалось выше, это может объясняться и изменениями в серийном (см. выше) и/или кинестетическом (продуктом работы теменных отделов коры [1]) звене речевой моторики (за счет улучшения звукопроизношения и переключения от одного звука к другому). По всей видимости, в этом возрасте данный компонент речевой системы развивается менее активно, что подтверждает современные представления о гетерохронности развития психических и мозговых систем в детском возрасте с неодновременным созреванием всех компонентов и наличием у каждого из них периодов интенсивного роста и более медленных преобразований [10, 19].

¹ Примером активного залога с обратным порядком слов может быть фраза “Мальчика вытаскивает девочка”, пассивного залога с обратным порядком — “Трактором перевозится машина”.

Целый ряд исследований подтверждают взаимосвязь между языковыми способностями (от беглости и выразительности до оформления предложений) и УФ [6, 20]. В связи с этим второе направление данного исследования заключалось в изучении **связи отдельных компонентов речевой системы с состоянием УФ** в двух разных возрастных группах. Для большинства компонентов речи структура связей в 5–6 и в 6–7 лет различалась. Так, в пробе на оценку **слухоречевой памяти** при отсутствии задачи на запоминание в 5–6 лет продуктивность первого воспроизведения обнаружила взаимосвязи с контролем, а в 6–7 — с программированием и избирательной регуляцией, т.е. уже в 6–7 лет даже при отсутствии внешней мнестической задачи дети сами ставят ее перед собой. Воспроизводя группы слов отсроченно после интерферирующего воздействия, дети 5–6 лет, по-видимому, пытаются задействовать как стратегии планирования, так и избирательной регуляции и контроля, а в 6–7 лет, как и при произвольном запоминании, основные взаимосвязи обнаруживаются с индексами программирования и избирательной регуляции. В то же время продуктивность произвольного (второго и третьего) воспроизведения слов в субтестах с постановкой мнестической задачи была связана с интегральным индексом дефицита УФ в обеих возрастных группах, что явилось ожидаемым результатом выполнения данной пробы. Продуктивность повторения двух групп по 3 слова, обычно позволяющая оценить сформированность **фонематического восприятия** и возможности **звукопроизношения**, в 5–6 лет оказалась не связанной с произвольной регуляцией, в отличие от группы детей 6–7 лет, что может указывать на более осмысленный и целенаправленный фонетико-фонематический анализ слов, чрезвычайно важный для овладения на следующем этапе обучения навыками письма и чтения. Завершая анализ связи УФ с импрессивной стороной речевой системы старших дошкольников, стоит упомянуть, что **понимание логико-грамматических конструкций** оказалось практически не связанным с состоянием УФ, если не считать связи этого процесса с переключением с программы на программу в 6–7 лет. В то же время связь УФ и импрессивной речи явно нуждается в более подробном исследовании, поскольку вербальная РП как компонент УФ вообще играет крайне большую роль в развитии речи: РП важна для кратковременного удержания вербальной информации, например, для понимания слов и устных сообщений [21].

Связь компонента **серийной организации моторной программы** речевого высказывания с общим уровнем развития УФ наблюдалась лишь в одном из четырех субтестов пробы со скороговорками, состоящем из 5 слов и включающем слова с шипящими и свистящими звуками. Интересно,

что в одном из исследований взаимосвязи УФ и способностей к артикуляции у детей 4–6 лет были получены значительные корреляции между высокими баллами при оценке УФ (на основе родительского опросника *BRIEF*) и успешностью в воспроизведении звуков речи при артикуляции звуков “с” и “ш” [22].

Значительно больше взаимосвязей речевой системы с УФ выявилось при анализе связной речи детей. Возможности **планирования** своего **речевого высказывания** при составлении рассказа по серии картинок оказались связаны с различными сторонами процесса регуляции своих действий как особой подсистемы УФ — с возможностью поддержания выполнения усвоенной программы, а в 6–7 лет — также и с успешностью переключения с одной программы на другую. Еще более многочисленные взаимосвязи прослеживаются для **грамматического оформления высказывания** — в 5–6 лет оно связано с возможностями усвоения программы, в 6–7 лет — с ее поддержанием и переключением с программы на программу, а также с контролем своих действий; можно предположить, что вовлеченность УФ в этот процесс с возрастом увеличивается. Это же касается и **лексического оформления высказывания**: в 5–6 лет уровень развития этой стороны речевой системы связан только с отдельными показателями состояния избирательной регуляции (усвоением программы, переключением с действия на действие и с программы на программу), а в 6–7 лет уже отмечаются его значимые связи с интегральными показателями индексов планирования, избирательной регуляции и контроля. В ряде исследований [23, 24] встречаются данные о лучшем развитии словарного запаса у детей с хорошими навыками тормозного контроля: это объясняется в целом возможностью целенаправленного управления своим поведением, подавлением ненужных мыслей и действий, что способствует лучшему обучению. Тормозный контроль также может облегчить семантический доступ к словам, похожим фонологически, но отличающимся семантически, что будет влиять на точность употребления слов [25].

Отдельно стоит обсудить связь УФ и **вербально-логического мышления**, которое также позволял оценить составленный детьми по серии картинок рассказ. В возрасте 5–6 лет его состояние, диагностируемое по правильности понимания смысла серии, тесно связано с процессами контроля, в 6–7 — уже с процессами избирательной регуляции (с которой связаны и грубые ошибки искажения смысла рассказа) и с интегральным индексом состояния УФ. Видно, что с возрастом связей мышления с УФ становится больше, а их структура меняется.

Таким образом, наиболее многочисленные связи с УФ продемонстрировали различные стороны связной экспрессивной речи (планирование, грамматическое и лексическое оформление высказывания), а также процессы слухоречевой памяти и вербально-логического мышления. Значительно меньшими эти связи оказались для нижежащего по отношению к этим процессам уровня работы со звуками — как в импрессивном (фонематическое восприятие), так и в экспрессивном (серийная организация моторной программы) звеньях, а также для такой стороны импрессивной речи, как понимание логико-грамматических конструкций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что в старшем дошкольном возрасте развитие УФ оказалось связано с состоянием сразу многих сторон речевой системы. Взаимозависимость этих сфер психики с возрастом становится более тесной — в 6–7 лет число связей между различными компонентами двух систем растет. При этом в разном возрасте одни и те же компоненты речевой системы связаны с разными компонентами системы УФ. Полученные в исследовании результаты позволяют лучше понимать степень взаимосвязи уровня зрелости УФ, т.е. процессов произвольной регуляции деятельности, и различных сторон речи. Очень важно, что эта связь показана, в том числе, для тех компонентов речевой системы, которые с нейрокогнитивной точки зрения могут быть связаны не только с уровнем развития процессов планирования, регуляции и контроля, но и с другими мозговыми механизмами. К примеру, хорошо видна значимая связь состояния УФ и не только связной речи (ее программирования и грамматического оформления), что вполне предсказуемо с точки зрения ее мозговой организации, но и самых разных показателей работы слухоречевой памяти, лексической стороны речи, вербально-логического мышления. Результаты исследования говорят в пользу классических и современных представлений о речи как об одном из важнейших условий формирования УФ и произвольной регуляции деятельности. Такое понимание дает возможность строить программу развития и коррекции речи в старшем дошкольном возрасте с опорой, в том числе, на формирование УФ, т.е. процессов произвольной регуляции, что сделает работу с речевыми трудностями старших дошкольников заметно эффективнее. Из него же следует обратное: при работе со слабостью функций планирования, избирательной регуляции и контроля крайне важно обеспечить работу и с речевой системой как с источником средств и инструментов произвольной саморегуляции.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Института возрастной физиологии РАО (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования (родитель либо законный представитель ребенка-участника исследования) представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. М.Н. Захарова — разработка концепции, проведение исследования, проведение статистического анализа, визуализация данных, подготовка текста и утверждение окончательного варианта статьи. А.Р. Агрис — проведение исследования, подготовка и редактирование текста.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лурия А.Р. Основы нейропсихологии. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1973. 374 с.
Luria A.R. Fundamentals of neuropsychology. Moscow: Moscow University Publ., 1973. 374 p.
2. Diamond A. Normal development of prefrontal cortex from birth to young adulthood: Cognitive functions, anatomy, and biochemistry / Principles of frontal lobe function // Eds. Stuss D.T., Knight R.T. Oxford University Press, 2002. P. 466.
3. Diamond A. Executive functions // Annu. Rev. Psychol. 2013. V. 64. P. 135.
4. Miyake A., Friedman N.P., Emerson M.J. et al. The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis // Cogn. Psychol. 2000. V. 41. № 1. P. 49.
5. Мачинская Р.И. Управляющие системы мозга // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2015. Т. 65. № 1. С. 33.
Machinskaya R.I. [The brain executive systems] // Zh. Vyssh. Nerv. Deyat. Im. I.P. Pavlova. 2015. V. 65. № 1. P. 33.
6. Niendam T.A., Laird A.R., Ray K.L. et al. Meta-analytic evidence for a superordinate cognitive control network subserving diverse executive functions // Cogn. Affect. Behav. Neurosci. 2012. V. 12. № 2. P. 241.
7. Bull R., Espy K.A., Wiebe S.A. Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years // Dev. Neuropsychol. 2008. V. 33. № 3. P. 205.
8. Geoffroy M.-C., Côté S.M., Giguère C.-É. et al. Closing the gap in academic readiness and achievement: The role of early childcare // J. Child Psychol. Psychiatry. 2010. V. 51. № 12. P. 1359.
9. Курганский А.В. Оценка управляющих функций у детей 3–6 лет: состояние, проблемы, перспективы // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2021. Т. 71. № 4. С. 468.
Kurgansky A.V. [Assessment of executive functions in children 3–6 years old: current state, problems and future directions] // Zh. Vyssh. Nerv. Deyat. Im. I.P. Pavlova. 2021. V. 71. № 4. P. 468.
10. Мозговые механизмы формирования познавательной деятельности в дошкольном и младшем школьном возрасте / Под ред. Мачинской Р.И., Фарбер Д.А. М.: НОУ ВПО "МПСУ"; Воронеж: МОДЭК, 2014. 440 с.
Brain mechanisms of the formation of cognitive activity in preschool and primary school age / Eds. Machinskaya R.I., Farber D.A. Moscow: NOU VPO "MPSU" Publ.; Voronezh: MODEK Publ., 2014. 440 p.
11. Garon N., Bryson S.E., Smith I.M. Executive function in preschoolers: A review using an integrative framework // Psychol. Bull. 2008. V. 134. № 1. P. 31.
12. Выготский Л.С. Орудие и знак в развитии ребенка / Собрание сочинений: В 6 т. Т. 6. Научное наследие. М.: Педагогика, 1984. С. 5.
Vygotsky L.S. Tool and sign in child development / Collected Works: in 6 vol. V. 6. Scientific heritage. Moscow: Pedagogika Press, 1984. P. 5.
13. Лурия А.Р. Основные проблемы нейролингвистики. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 252 с.
Luria A.R. Basic problems of neurolinguistics. M.: Moscow University Publ., 1975. 252 p.
14. Shokrkon A., Nicoladdis E. The directionality of the relationship between executive functions and language skills: a literature review // Front. Psychol. 2022. V. 13. P. 848696.
15. Ахутина Т.В., Камардина И.О., Пылаева Н.М. Нейропсихолог в школе. М.: Изд-во В. Секачев, 2016. 56 с.
Akhutina T.V., Kamardina I.O., Pylaeva N.M. Neuropsychologist at school. M.: V. Sekachev Publ., 2016. 56 p.
16. Методы нейропсихологического обследования детей 6–9 лет / Под ред. Ахутиной Т.В. М.: Изд-во В. Секачев, 2016. 280 с.
Methods of neuropsychological examination of children aged 6–9 years / Ed. Akhutina T.V. Moscow: V. Sekachev Publ., 2017. 280 p.
17. Семенова О.А. Методика оценки функций произвольной регуляции деятельности у детей младшего школьного возраста // Новые исследования (альманах). 2006. Т. 10. № 2. С. 71.
18. Семенова О.А., Мачинская Р.И., Ломакин Д.И. Влияние функционального состояния регуляторных систем мозга на эффективность программирования, избирательной регуляции и контроля // Физиология человека. 2015. Т. 41. № 4. С. 5.
Semenova O.A., Machinskaya R.I., Lomakin D.I. The influence of the functional state of brain regulatory systems on the programming, selective regulation and control of cognitive activity in children. Report I: Neuropsychological and EEG analysis of age-related changes in brain regulatory functions in children aged 9–12 years // Human Physiology. 2015. V. 41. № 4. P. 345.

19. Захарова М.Н., Мачинская Р.И. Возрастные изменения управляющих функций у детей 6–7 лет // Психологические исследования. 2022. Т. 15. № 81. С. 6.
Zakharova M.N., Machinskaya R.I. The development of executive functions in children aged 6–7 years // *Psychological Studies*. 2022. V. 15. № 81. P. 6.
20. Engelhardt P.E., Nigg J.T., Ferreira F. Is the fluency of language outputs related to individual differences in intelligence and executive function? // *Acta Psychol.* 2013. V. 144. № 2. P. 424.
21. Baddeley A., Gathercole S., Papagno C. The phonological loop as a language learning device // *Psychol. Rev.* 1998. V. 105. № 1. P. 158.
22. Netelenbos N., Gibb R.L., Li F., Gonzalez C.L.R. Articulation speaks to executive function: An investigation in 4- to 6-year-olds // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. P. 172.
23. Ekerim M., Selcuk B. Longitudinal predictors of vocabulary knowledge in Turkish children: The role of maternal warmth, inductive reasoning, and children's inhibitory control // *Early Educ. Dev.* 2017. V. 29. № 3. P. 1.
24. McClelland M.M., Cameron C.E., Connor C.M. et al. Links between behavioral regulation and preschoolers' literacy, vocabulary, and math skills // *Dev. Psychol.* 2007. V. 43. № 4. P. 947.
25. Mirman D., Britt A.E. What we talk about when we talk about access deficits // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 2013. V. 369. № 1634. P. 20120388.

The Development of Various Speech Components and Their Relations with the State of the Brain Executive Functions in Senior Preschool Age

M. N. Zakharova^{a, b, c, *}, A. R. Agris^{b, c, d}

^a*Institute of Developmental Physiology of RAE, Moscow, Russia*

^b*Multidisciplinary Psychological Center "Territory of Happiness", Moscow, Russia*

^c*Institute of Developmental Neuropsychology, Moscow, Russia*

^d*The Institute of Social Sciences, RANEP, Moscow, Russia*

*E-mail: zmn@idnps.ru

The brain executive functions (EF) are crucial for various aspects of childrens' development, as they stipulate control of cognitive processes and behavior. Speech development is one of the most important goals of preschool age and a defining predictor of successful school education. Both classical and contemporary studies stress relations between the given functions. In order to achieve an in-depth comprehension of the relations we have deepened a comparative neuropsychological research by means of complemented speech functions assessment (phonological process, verbal memory, motor program sequencing, grammatical and lexical speech design, planning of utterance) and conducted it targeting children aged 5–6 ($n = 61$, average age – 5.67 ± 0.33 y.) and 6–7 ($n = 117$, average age – 6.67 ± 0.29 y.). The research has revealed age-specific differences of the given age groups (verbal memory ($p \leq 0.002$), comprehension of logical grammatical constructions ($p < 0.001$), lexical ($p = 0.031$) and grammatical ($p = 0.008$) speech design, planning of utterance ($p < 0.001$)). A coherency of speech and the state of EF development increases from 5–6 to 6–7 years old and is evident in various aspects of coherent speech (planning of utterance and its grammatical and, to a lesser degree, lexical speech design), verbal memory and verbal logical thinking; in phonological processing, motor program sequencing and comprehension of logical grammatical constructions, however, it is less evident as it is related to particular indexes, but still exists. The following research findings can be used to further voluntary regulated speech development and correction programs targeting senior preschoolers, as well as to develop voluntary regulation and control incorporating various speech components.

Keywords: brain executive functions, working memory, inhibitory control, cognitive flexibility, preschool age, neuropsychology, speech, phonological process, verbal memory, serial organization, vocabulary, grammar, motor program sequencing.

УДК 612.821

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ “ПЕРЕРАБОТКИ” МЕТАФОРИЧЕСКОГО СМЫСЛА ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОРИГИНАЛЬНЫЕ НАЗВАНИЯ

© 2023 г. Ж. В. Нагорнова¹ *, В. А. Галкин¹, Н. В. Шемякина¹

¹ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии
имени И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: nagornova_zh@mail.ru

Поступила в редакцию 12.12.2022 г.

После доработки 02.02.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

В данной работе были исследованы особенности связанных с событием потенциалов (ССП) при придумывании подростками названий к разным по содержанию и стилистике художественным изображениям. В двух исследованиях приняли участие 36 подростков (16 м: 20 ж, средний возраст: 15.9 ± 1.1 лет). В качестве стимульного материала использовали изображения из категорий – “карикатуры”, “сюжетные зарисовки” и “живопись”. Задача придумывать названия к работам современных художников, содержащих метафоры и символы, а именно: к “сюжетным зарисовкам” и “карикатурам” рассматривалась, как конвергентная творческая задача, тогда как работа с изображениями из категории “живопись” – как более открытая, дивергентная творческая задача. При придумывании названий к “сюжетным зарисовкам” в сравнении с “карикатурами” амплитуда ССП на интервалах 116–208 и 492–656 мс была больше в теменно-затылочных и лобных, центральных, теменных областях левого полушария, соответственно. Во втором исследовании, при придумывании названий к изображениям в авторском стиле по сравнению с реалистичными изображениями этого же художника – различия ССП были выявлены в затылочных областях (152–264 мс), лобных и затылочных областях билатерально (308–440 мс) и лобных, височных, центральных и теменных областях с акцентом в левом полушарии (544–600 мс). Поздняя положительная волна, выявленная в двух исследованиях (с латентностью 492–656 мс в сравнении “сюжетные зарисовки” vs “карикатуры” и 544–600 мс в сравнении “авторский стиль” vs реалистичные изображения) может быть связана с извлечением и анализом метафорического смысла и символов изображений для создания вербальной интерпретации (придуманного названия). Только при выполнении конвергентной творческой задачи (тесно связанной с интерпретацией замысла художника) нахождение ответа сопровождалось меньшей амплитудой поздних различий на интервале 1300–1650 мс (за более чем 1500 мс до момента обозначения нахождения ответа), тогда как значимых различий между нахождением и отсутствием ответа во втором исследовании выявлено не было. В условиях единой инструкции, авторы предположили, что в первом исследовании нахождение ответа сопровождалось более выраженным процессом сличения/сопоставления собственных идей с неким искомым (заложенным художником) смыслом, что выражалось в поздних отличиях между условиями нахождения и отсутствия ответа, тогда как во втором исследовании, в условиях дивергентной задачи – процесс сличения собственного и заложенного смысла был выражен слабее и не отразился в ряде поздних отличий.

Ключевые слова: связанные с событием потенциалы, изображения, визуальные метафоры, сюжетные зарисовки, карикатуры, живопись, вербальное творчество, подростки.

DOI: 10.31857/S0131164623700236, **EDN:** GHXLHN

Изучение разных аспектов творческой деятельности [1–4] представляет особый интерес в разрезе представлений о том, что именно творческая активность может рассматриваться, как один из самых человеческих видов деятельности [5].

Обычно под творческой деятельностью понимают способность создавать что-то новое и полезное [6], отклоняться в мышлении от стереоти-

пов [7–9] и находить решения при минимуме доступной информации [10, 11].

Одним из важных компонентов творческого мышления является способность ассоциировать информацию из разных областей знаний и соотносить смыслы [12–14], видеть ситуацию с разных точек зрения, что крайне важно для решения дивергентных задач [15], реагировать на иронические и метафорические сюжеты [16–18]. Умение

понимать метафоры и юмор, в самых различных его проявлениях, часто описывается как необходимый элемент творческого мышления [19–21].

Восприятие, понимание и анализ метафорических смыслов активно исследуются нейробиологами с использованием вербальных метафор [22–24]. В нашем исследовании подросткам предъявляли изображения из категорий “сюжетные зарисовки”, “карикатуры” и “живопись”, содержащие определенные ассоциативные ряды, метафоры и символы.

Выделяют различные виды метафор (вербальные, визуальные; общеупотребительные/авторские или “новые” [25–28]; глагольные/именные [29]) вместе с тем, все их объединяет наличие образного смысла, уподобления одного предмета другому, что кроется в самом определении метафоры [30], переноса свойств одного объекта к другому.

В исследованиях с близкой нам парадигмой предъявления стимулов было показано, что при зрительном восприятии фраз, содержащих переносный смысл амплитуда компонента ССП – N400 больше (более негативное отклонение), чем при словосочетании с буквальным смыслом [22]. В исследованиях [23, 24] были выдвинуты предположения о том, что когнитивный компонент N400 может быть связан с восприятием контекстуальных аспектов читаемой фразы, а P600 — с процессами интерпретации фразы содержащей метафору, происходящими во время понимания ее смысла. В исследовании [31] выяснили, что только на “литературные” метафоры (авторские, взятые из современных художественных текстов и являющиеся “новыми” для человека) в сравнении с “не-литературными” метафорами и фразами с буквальным смыслом регистрировался когнитивный компонент N400 (430–530 мс), а более ранний компонент P200 (170–260 мс), связанный с вниманием, имел большую амплитуду в левых лобных зонах по сравнению с восприятием “не-литературных” метафор. В этих же и центральных отведениях в интервале соответствующем P200 была выявлена большая мощность в $\Delta(1-4 \text{ Гц})$ -диапазоне ЭЭГ при восприятии литературных метафор в сравнении с “не-литературными” метафорами. Более поздний интервал (430–530 мс) характеризовался большей связанной с событиями мощностью θ -диапазона (4–8 Гц) ЭЭГ для литературных метафор в сравнении с “не литературными”, и, в обоих случаях — большими значениями мощности в сравнении с буквальными выражениями.

В исследовании с предъявлением визуально-вербальных метафор (изображение машины, а затем — название животного) сравнивались ССП при предъявлении метафор с конгруэнтным изображением и названием объекта и метафоры с не-

конгруэнтным содержанием. Было выяснено, что идентификация конгруэнтных метафор происходила дольше (700 ± 202 против 663 ± 187 мс), амплитуда компонентов ССП N300 и N400 на них была больше (более негативное отклонение), а амплитуда P600 — больше в сравнении с неконгруэнтными метафорами [32].

Восприятие переносного смысла и способность понимать метафоры (вербальные и невербальные) — важный компонент психического здоровья людей. По результатам исследования функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) в группе пациентов с шизофренией анализ истории, приобретающей метафорический смысл в сравнении с буквальным за счет предъявления последнего слова, выявил снижение активации в дорсальной передней поясной коре билатерально, левых — лобной доле (*IFG pars opercularis*, *MFG*, *SFG*), предклинье, островке, верхней височной (*STG*), угловой и надкраевой извилинах, и в правых — инселе, лобно-височной области (*IFG/STG*) [33].

Отдельные исследования показывают, что при обработке метафор, юмора и иронии наблюдаются схожие эффекты. В исследовании [34] при предъявлении последнего слова во фразе, определяющего ее смысл (“*punchline based paradigm*”) была выявлена большая негативность N400 при предъявлении слов с ироническим или метафорическим смыслом в сравнении с предъявлением слов с буквальным значением.

В ряде работ [35, 36] получены данные о вовлеченности сенсомоторной коры в процесс обработки метафор. В работе [37] было показано, что предложения содержащие “фиктивное” движение вызывали активацию в правой парагиппокампальной извилине, “метафорическое” движение в левой прецентральной извилине, а “идиоматическое” движение в левой нижней лобной извилине.

Также не до конца проясненным является вопрос о латерализации процессов, связанных с анализом метафорического смысла. Некоторые исследования указывают на большую вовлеченность правого полушария [38, 39], в то время как другие не находят этому подтверждения [40] или показывают обратные эффекты [41]. Третьи, в свою очередь, показывают либо равную вовлеченность полушарий в процесс обработки метафор, либо указывают зависимость от контекста или иных условий, при которых метафора воспринимается [42].

Отдельно стоит тема исследования невербальных/визуальных метафор, в основном, представленная в области нейромаркетинга. Так, например, было показано, что наличие метафоры в визуальной рекламе, при ее понимании, вызывает большую заинтересованность потребителя, веро-

ятность дальнейшего ознакомления и покупки им объекта рекламы [43]. В ЭЭГ-исследовании восприятия сюрреалистичных рекламных изображений [44] в ответ на двойную метафору, по сравнению с одинарной, была выявлена большая мощность в задней поясной коре левого полушария (8–13 Гц) и в правом предклинье (8–13; 14–30 Гц); а также — меньшая мощность в островковой доле (4–7; 14–30; 31–100 Гц) при локализации диполей. При этом в сравнении с отсутствием метафоры во всех перечисленных выше областях и диапазонах ЭЭГ-мощность была меньше. По результатам самоотчетов изображения с большим количеством метафор вызывали у испытуемых интерес к продукту и намерение купить.

Цель настоящей работы состояла в изучении особенностей ССП у подростков в ответ на визуальное предъявление произведений живописи, содержащих метафоры, иронию и символы. При этом подростки не просто пассивно воспринимали изображение, а решали творческую задачу — их просили дать название изображению, отражающее его смысл. В ситуации придумывания названия к изображению решается задача понимания метафорического смысла изображения и поиска художественных вербальных ассоциаций. При исследовании планировали проверку нескольких гипотез. Предполагали, что разная стилистика стимулов (“сюжетные зарисовки”, “карикатуры”, “живопись”) будет отражаться не только в физиологических, но и в поведенческих характеристиках (сложности задания, эмоциональном фоне, количестве ответов, времени ответа). Рассчитывали обнаружить ранние энцефалографические предикторы нахождения ответа при выполнении творческой задачи.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 36 здоровых подростков обоих полов, учащиеся школ Санкт-Петербурга; с нормальным или скорректированным зрением: 16 юношей, 20 девушек (13–18 лет: медиана: 16 лет; нижний квартиль: 15; верхний квартиль: 17).

Психологическое исследование. Перед ЭЭГ/ССП исследованием испытуемые выполняли ряд психологических заданий для оценки: когнитивных (прогрессивные матрицы [45], вербальных творческих (тест отдаленных ассоциаций *T. Mednick* [46] в адаптации [47]) и невербальных творческих способностей (субтест Е. Торренса “незавершенные эскизы” по [48]).

Процедура психофизиологического исследования. Испытуемые участвовали в двух исследованиях ССП с идентичным протоколом, инструкцией и структурой проб, но с разным стимульным материалом. В качестве стимулов использовали спе-

циально отобранные изображения произведений современных художников (А. Попов, Ю. Потапов и В. Богорад, В. Шилов), предъявляемые на мониторе компьютера. Изображения использовали с согласия авторов, предоставивших изображения безвозмездно или на основе покупки лицензии.

В заданиях испытуемым необходимо было придумать название/подпись к изображению, передающее/передающую суть того, что на нем изображено. В каждой пробе в период обдумывания испытуемый должен был, в случае придуманного ответа — мысленно его проговорить и нажать на кнопку, а после предъявления разрешающего ответ знака вопроса — озвучить ответ. В случае отсутствия ответа, испытуемый на кнопку не нажимал, а после предъявления знака вопроса говорил “нет” (соответствует ранее использованной в исследованиях структуре заданий [49–51]).

Предъявляемые на мониторе компьютера изображения были изначально выполнены либо на холсте маслом, либо в технике “графика”. По содержанию указанные изображения были разделены на три категории: картины — “сюжетные зарисовки” (А. Попов), “карикатуры” (В. Богорад, В. Шилов) и “живопись” (Ю. Потапов), вне зависимости от техники исполнения.

В исследованиях были заложены условия посещения выставки нескольких художников, картины которых характеризуются разным содержанием, техникой исполнения и стилем произведений.

Можно предположить, что различия в амплитуде и латентности наиболее ранних компонентов ССП — до 200 мс могут быть связаны с рядом визуальных различий стимулов, тогда как более поздних компонентов — с пониманием/переработкой метафорического смысла изображений в рамках единой инструкции. Различия ближе ко времени обозначения нахождения ответа (нажатия на кнопку) могут быть рассмотрены, как связанные с особенностями придумывания/поиска и нахождения решения в условиях постановки творческой задачи.

Данные первого и второго исследования не сравнивали напрямую, в силу различных условий предъявления изображений.

В первом исследовании подросткам предъявляли пробы с изображениями из категорий “сюжетные зарисовки” (холст, масло) и “карикатуры” (графика) (количество стимулов 50 : 51), изображения были перемешаны между собой случайным образом. Угловые размеры предъявления изображений в среднем составляли 5.344° по горизонтали и 5.725° по вертикали.

Во втором исследовании испытуемым предъявляли изображения из категории “живопись” — картины Ю.Г. Потапова, написанные на холсте маслом в реалистичной манере или с использова-

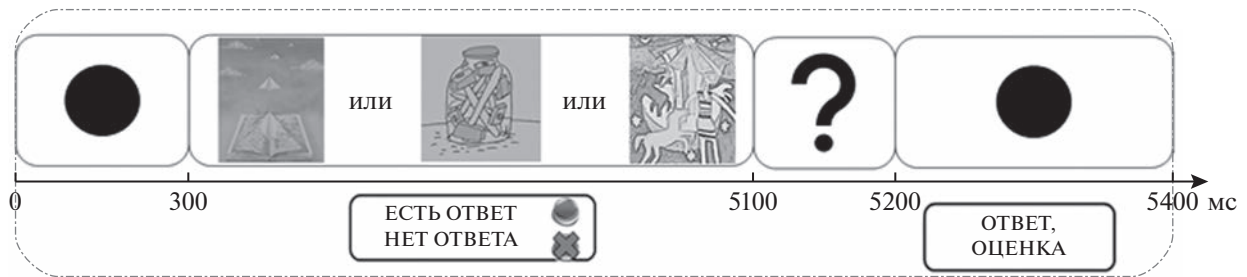


Рис. 1. Схема отдельной пробы исследований.

нием индивидуального стиля художника (разработан совместно с О.В. Николаенко на основе стилистики изображений древних культур). Далее в этом исследовании сравнения проводили с учетом стиля художественного изображения. Угловые размеры предъявления изображений в среднем составляли 13.12° по горизонтали и 7.438° по вертикали. Пример организации проб в обоих исследованиях приведен на рис. 1. Длительность межпробного интервала варьировала в интервале от 3000 до 3500 мс, т.е. момент следующего предъявления стимула не был известен испытуемому.

Порядок начала выполнения заданий был рандомизирован между испытуемыми. Перед выполнением исследования с каждым испытуемым проводили тренировочную сессию. После исследования испытуемые давали самоотчет о субъективной сложности заданий по 10-балльной шкале (1; 10) и оценивали знак и силу эмоций во время выполнения заданий в интервале от -10 до $+10$ (где -10 — резко негативные, а $+10$ — крайне положительные эмоции).

Регистрация и предобработка ЭЭГ. ЭЭГ регистрировали на двух энцефалографах. На 32-канальном электроэнцефалографе Мицар 202 (ООО Мицар, Россия) — монополярно от 31-го отведения, частота дискретизации (ЧД) 500 Гц, и на 24-канальном энцефалографе *smartBCI* (ООО Мицар, Россия) — монополярно от 19 отведений, ЧД 250 Гц. В обоих случаях референтом служил объединенный ушной электрод, заземляющий электрод располагали в передне-центральной отведении, сопротивление электродов не превышало 5 кОМ, режекторный фильтр соответствовал 50 Гц. Для регистрации и анализа данных использовали программный пакет *WinEEG* (Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д., № государственной регистрации 2001610516 от 08.05.2001), для предъявления стимулов — программный пакет *PSYTASK* (Пономарев, 2001).

Для проведения предобработки полученные ЭЭГ/ССП данные были приведены к единому формату — 19 каналов, ЧД 250 Гц, полоса анализа 1.6–30 Гц. Для удаления глазодвигательных артефактов использовали метод пространственной

фильтрации путем обнуления независимых компонент ЭЭГ [52–54]. Из анализа исключали фрагменты ЭЭГ, содержащие медленные волны (0–2 Гц с амплитудой выше 50 мкВ) и быстрые волны (25–35 Гц с амплитудой выше 35 мкВ), общая фильтрация ЭЭГ исключала фрагменты, содержащие волны с амплитудой больше 150 мкВ. Далее проводили визуальный анализ данных для удаления оставшихся глазодвигательных и мышечных артефактов.

Вычисление и анализ ССП. Для более наглядного представления, анализ ССП приводили в полосе 1.6–15 Гц (так же, как в [49]). Индивидуальные усредненные связанные с событием потенциалы рассчитывали для каждого испытуемого, для каждого типа проб, для каждого отведения во временном окне от -300 до 2000 мс после начала предъявления стимула. Именно этот временной интервал включал значимые различия ССП (при этом среднее время нажатия во всех заданиях было больше 3000 мс — см. табл. 1) и позволил избежать рассмотрения возможных эффектов, связанных с подготовкой и реализацией спонтанного моторного ответа [55].

Связанные с событием потенциалы в исследовании № 1 были рассчитаны для сравнений “сюжетные зарисовки” vs “карикатуры”, в исследовании № 2 для изображений “собственный стиль” vs “реалистичные изображения” и: “наличие ответа” vs “отсутствие ответа” в обоих исследованиях. Временные интервалы и зоны интереса для статистического анализа определяли по полумаксимумам разностных волн между усредненными в общей группе испытуемых потенциалами для этих сравнений. Например, для оценки различий ССП между условиями “наличие ответа” и “отсутствие ответа” в исследовании № 1: рассчитываются ССП для каждого из этих состояний. Строится разностная волна по различиям амплитуд между этими потенциалами в каждом отчете (4 мс, согласно ЧД). Далее оцениваются отклонения этой волны от изолинии (в положительную или отрицательную сторону): топографии различий (т.е. единообразные изменения на соседних электродах) и временные интервалы. Для опреде-

Таблица 1. Характеристика группы подростков 14–17 лет, поведенческие данные

Название теста/показателя	Медиана (25, 75) квартиль	
	N28 результативная ¹	N8 малорезультативная ^{2, 3}
Прогрессивные матрицы Равена (<i>IQ</i>)	114 (108, 120)	117 (116, 123)
Оригинальность невербального творческого мышления (субтест Торренса “Эскизы”), шкала от 0 до 10	5.37 (3.75, 6.46)	4.79 (2.38, 5.84)
Оригинальность конвергентного творческого мышления (тест отдаленных ассоциаций Медника), шкала от 0 до 1	0.72 (0.46; 0.84)	0.72 (0.43; 0.81)
Время нахождения решения для изображений из категории “сюжетные зарисовки”, мс*	3256 (3090; 3486)	3640 (3543; 3965)
Время нахождения решения для изображений из категории “Карикатуры”, мс**	3352 (3044; 3490)	3744 (3508; 4020)
Время нахождения решения для изображений из категории “живопись”, мс*, **	3087 (2793, 3314)	3471 (3135; 3584)
Процент ответов для изображений из категории “сюжетные зарисовки”, %***	66 (58, 81)	14 (13; 22)
Процент ответов для изображений из категории “Карикатуры”, %****	63 (57, 71)	21 (12; 22)
Процент ответов для изображений из категории “живопись”, %***, ****	70 (59, 79)	23 (18; 35)
Сложность выполнения задания для изображений из категории “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”, шкала от 0 до 10	5.0 (4.0, 7.0)	7.0 (6.5, 8.0)
Сложность выполнения задания для изображений из категории “живопись”, шкала от 0 до 10	5.0 (4.0, 6.0)	6.0 (4.0, 6.5)

Примечание: жирным шрифтом выделены значимые различия между выборками N28 и N8. ¹ — значимые отличия для группы N28 (критерий Вилкоксона): * — время придумывания ответа “сюжетные зарисовки” vs “живопись” ($Z = 2.27, p < 0.05$), ** — время придумывания ответа “карикатуры” vs “живопись” ($Z = 2.69, p < 0.01$), *** — процент ответов “сюжетные зарисовки” vs “живопись” ($Z = 4.29, p < 0.0001$), **** — процент ответов “карикатуры” vs “живопись” ($Z = 4.25, p < 0.0001$). ² — значимые отличия для группы N8 (критерий Вилкоксона): * — время придумывания ответа “сюжетные зарисовки” vs “живопись” ($Z = 2.1, p < 0.05$), ** — время придумывания ответа “карикатуры” vs “живопись” ($Z = 2.38, p < 0.05$). ³ — поведенческие и психологические данные восьми испытуемых приводятся отдельно, физиологические данные этих испытуемых были исключены из анализа ССП в исследовании № 1, т.к. содержали мало проб с ответами.

ления временного интервала различий в каждом интервале различий находится наибольшая амплитуда разностной волны (максимум) и определяются: точка начала временного интервала от момента предъявления стимула, в которой амплитуда переходит половину максимума, и точка окончания временного интервала, в котором амплитуда становится меньше половины максимума. Далее амплитуды ССП в исходных сравниваемых состояниях усредняются для статистического анализа в выделенных таким образом временных интервалах.

Статистический анализ данных. Использовали дисперсионный анализ ANOVA для повторных измерений с учетом факторов: СОСТОЯНИЕ (“сюжетные зарисовки”/“карикатуры”; (“наличие/отсутствие ответа”; “собственный стиль”/“реалистичные изображения”) и ЗОНА (19 отведений/зоны интереса (ЗИ)). Уровень статистической значимости различий рассматривали с учетом

коррекции Гринхауза–Гайзера и соответствия $p < 0.05$.

Анализ психологических и поведенческих данных (времени ответа и количества ответов между различными типами стимулов) осуществляли при помощи непараметрических критериев (Вилкоксона, Манна–Уитни, Спирмена). Статистический анализ проводили с использованием пакета *Statistica 10*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Общая характеристика группы подростков. Общая характеристика группы участников и результаты психологического тестирования подростков, а также поведенческие показатели выполнения заданий приведены в табл. 1.

Общая группа подростков — участников исследования характеризовалась высокими когнитив-

Таблица 2. Различия связанных с событием потенциалов (ССП) при предъявлении изображений из категории “сюжетные зарисовки” в сравнении с изображениями из категории “карикатуры” при условии наличия ответа

Интервал (мс), ~ компонент ССП	Статистические эффекты	Зоны различий	Физиологические эффекты (амплитуды)
116–208	ЗИ (T_5-O_2): $C: F_{(1,27)} = 15.6$, $p < 0.0005$; $C * 3: F_{(18,486)} = 6.6$, $p < 0.00001$, $\epsilon(G-G): 0.58$	Теменные и затылочные области: T_5, P_3, P_z, P_4 , T_6, O_1, O_2	“сюжетные зарисовки” > “карикатуры”
492–656	$C: F_{(1,27)} = 15.5$, $p < 0.001$; $C * 3: F_{(18,486)} = 3.4$, $p < 0.00001$, $\epsilon(G-G): 0.27$	$Fp_1, Fp_2, F_7, F_3, F_z, F_4, T_3$, $C_3, C_z, C_4, T_5, P_3, P_z, P_4$	“сюжетные зарисовки” > “карикатуры”

Примечание: “сюжетные зарисовки” < / > “карикатуры” – амплитуда ССП при предъявлении изображения из категории “сюжетные зарисовки” меньше/больше, чем при предъявлении изображения из категории “карикатуры”, ЗИ – Зона Интереса, С – фактор СОСТОЯНИЕ, С * 3 – взаимодействие факторов СОСТОЯНИЕ * ЗОНА, F – критерий Фишера, $\epsilon(G-G)$ – поправка Гринхауза–Гайзера; $Fp_1, Fp_2, F_7, F_3, F_z, F_4, T_3, C_3, C_z, C_4, T_5, P_3, P_z, P_4, T_6, O_1, O_2$ – положение электродов на поверхности головы (согласно системе 10–20%).

ными способностями – показатели интеллекта соответствовали верхней границе нормы или были выше. Как в результативной, так и в малорезультативной подгруппах время нахождения и количество ответов (%) не отличались при придумывании названий к изображениям из категорий “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”. При этом в этих заданиях время нахождения ответа было больше, а количество ответов – меньше в сравнении с придумыванием названий к изображениям из категории “живопись”. Сложность задач не отличалась, в обоих исследованиях задания были связаны с неярко выраженными положительными эмоциями (в среднем 3 балла по шкале (–10; 10)).

При анализе психологических и поведенческих данных не было выявлено корреляций между оригинальностью при выполнении вербального ([46] в адаптации [47]), невербального [48] творческих тестов и уровнем интеллекта [45], а также с количеством ответов в заданиях психофизиологических исследований.

Вместе с тем, наблюдается положительная корреляция показателя “абстрактность названия” в невербальном тесте Торренса (выполнявшемся отдельно) с количеством ответов при придумывании названий в заданиях исследования – для изображений из категории “сюжетные зарисовки” ($R_s = 0.68$, $Z = 4.24$, $p < 0.0001$), “карикатуры” ($R_s = 0.62$, $Z = 4.17$, $p < 0.0001$) и “живопись” ($R_s = 0.68$, $Z = 2.99$, $p < 0.005$).

Результативная группа отличалась от малорезультативной меньшим временем реакции при придумывании названий к изображениям категории “сюжетные зарисовки” ($Z = -3.48$, $p < 0.001$) и “карикатуры” ($Z = -2.49$, $p < 0.05$). По когнитивным характеристикам и характеристикам творческой деятельности подгруппы друг от друга не отличались.

В ходе исследования проверили подгруппы подростков (*RM ANOVA* для взаимодействия внутригруппового фактора ЗОНА и межгруппового фактора РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ) на различия в спектрах мощности ЭЭГ в состояниях спокойного бодрствования с открытыми и закрытыми глазами (θ (4–8 Гц), α_1 (8–10 Гц), α_2 (10–13 Гц), β_1 (13–18 Гц), β_2 (18–30 Гц)). Различий выявлено не было.

Исследование № 1. Анализ ССП при придумывании названий к изображениям из категорий “сюжетные зарисовки” в сравнении с изображениями из категории “карикатуры”.

В исследовании с использованием “сюжетных зарисовок” и “карикатур” в анализ ССП вошли данные 28 чел. (11 юношей; 17 девушек). Данные восьми испытуемых были исключены из анализа в силу большого количества артефактов или же малого количества ответов (менее 20).

При сравнении проб с изображениями из категории “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”, в условия нахождения ответа, были получены достоверные различия в двух временных интервалах – 116–208 и 492–656 мс. В первом, более раннем интервале (116–208 мс) различия регистрировались в теменных и затылочных областях, во втором (492–656 мс) – по всей поверхности головы, за исключением – височных зон правого полушария и затылочных областей билатерально (табл. 2). В обоих интервалах амплитуда при предъявлении “сюжетных зарисовок” была выше в сравнении с предъявлением “карикатур”.

Как видно на рис. 2 более ранние различия (116–208 мс) выявлены билатерально в теменно-затылочных областях, а более поздние различия (492–656 мс) наблюдаются с максимумом различий в левой лобной области.

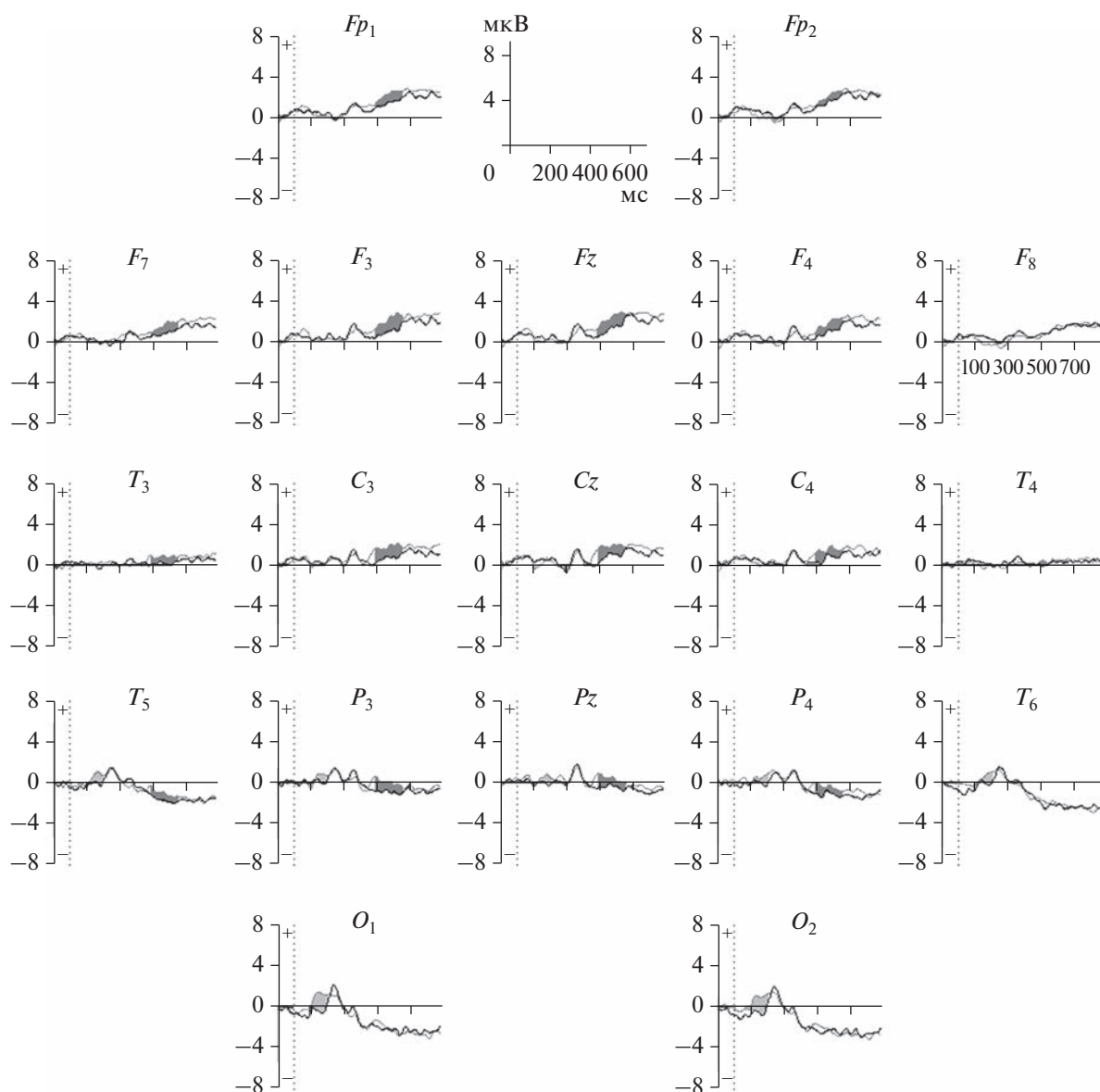


Рис. 2. Связанные с событием потенциалы (ССП) при восприятии изображений и придумывании названий к картинкам из категорий “сюжетные зарисовки” (серая линия) и “карикатуры” (черная линия). Fp_1 – O_2 – электроды; по оси x – время (мс), по оси y – амплитуда ССП (мкВ). Вертикальная серая пунктирная линии – начало предъявления стимула. Серая заливка разных оттенков – интервалы значимых различий.

Сравнительный анализ ССП в условиях “наличия/отсутствия” придуманного ответа, без учета категории изображения.

Изначально предполагали, что компоненты ССП, когда испытуемый придумал или не придумал ответ – могут различаться уже на ранних этапах [56]. В ситуации придумывания названий к изображениям в нашем исследовании – гипотеза о возможности предсказания наличия ответа по ранним различиям ССП не подтвердилась.

При сравнении проб в условиях наличия и отсутствия ответа при придумывании названий к изображениям из категории “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”, независимо от типа стимулов, были выявлены достоверные различия в позднем временном интервале 1300–1650 мс (табл. 3), в центральных отведениях и характеризовались меньшей амплитудой при наличии ответа.

Исследование № 2. Анализ связанных с событием потенциалов при придумывании названий к изображениям, выполненным в собственном авторском стиле в сравнении с выполненными в реалистичном стиле из категории “живопись”.

В исследование с использованием изображений из категории “живопись” вошли данные 32 испытуемых. В этом исследовании подростки

Таблица 3. Различия связанных с событием потенциалов (ССП) в общем наборе стимулов в условиях наличия и отсутствия ответа при придумывании названий к изображениям из категории “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”

Интервал (мс), ~ компонент ССП	Статистические эффекты	Зоны различий	Физиологические эффекты (амплитуда)
1300–1650	ЗИ ($F_3, F_z, F_4, C_3,$ C_z, C_4, C_3, C_z, C_4): $C: F_{(1,27)} = 8.6, p < 0.01$	Лобные: F_3, F_z, F_4 Центральные отведения: C_3, C_z, C_4 Теменные: P_3, P_z, P_4	Ответ < нет ответа

Примечание: ответ < нет ответа – амплитуда ССП была меньше для проб с найденными ответами по сравнению с ССП для проб, где ответы найдены не были вне зависимости от категории предъявленных изображений. Остальные обозначения см. табл. 2.

Таблица 4. Различия связанных с событием потенциалов (ССП) при придумывании названий к изображениям, выполненным в авторском стиле в сравнении с реалистичными изображениями

Интервал (мс)	Статистические эффекты	Зоны различий (<i>post-hoc</i>)	Физиологические эффекты (авторский стиль vs реалистичные изображения)
(I) 152–264	$C * 3: F_{(18,612)} = 3.7, p < 0.01,$ $\epsilon(G-G) = 0.21$	Лобные: Fp_1 Затылочные: O_1, O_2	Менее негативное отклонение во лбу, менее позитивная волна в затылке
(II) 308–440	$C * 3: F_{(18,612)} = 6.1, p < 0.01,$ $\epsilon(G-G) = 0.21$	Лобные: $Fp_1, Fp_2, F_7, F_3, F_z, F_4, T_3$ Затылочные: O_1, O_2	Менее негативное отклонение во лбу, менее позитивная волна в затылке
(III) 544–600	$C * 3: F_{(18,612)} = 2.5, p < 0.01,$ $\epsilon(G-G) = 0.26$	Лобные: Fp_1, Fp_2, F_3, F_z Височные: F_7, T_3 Центральные: C_3, C_z Теменные: P_3, P_z	Большая амплитуда

Примечание: см. табл. 3.

при придумывании названий давали значимо больше ответов (68–79%) и делали это быстрее, чем при работе с изображениями из категорий “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”. Сложность задачи и общий эмоционально-положительный фон задания не отличались от тех же показателей в исследовании № 1.

Сравнение ССП при придумывании названий, которые заканчивались нахождением ответа или отсутствием ответа – в данном исследовании не выявило отличий. Вместе с тем, три интервала отличий были выделены в ситуации сравнения ССП при придумывании названий к изображениям, выполненным в разной стилистике (табл. 4). Связанные с событием потенциалы при придумывании названий к картинам, выполненным в разной стилистике, приведены на рис. 3.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Работа включала в себя два взаимодополняющих исследования с участием подростков: первое

исследование было связано с восприятием метафорических и карикатурных изображений, придумывание названий к которым являлось, своего рода, конвергентной задачей и, как можно полагать, базировалось на понимании заложенных авторами метафор. Второе исследование было связано с восприятием художественных произведений, выполненным в авторской стилистике и содержащих символы и метафоры в сравнении с восприятием картин этого же художника, написанных в реалистичном стиле и содержащих мало символов.

В подростковый период уже складывается абстрактное мышление и понимание метафорического и символического смыслов, формируется творческое мышление. Анализ нейрофизиологических показателей при понимании метафорического смысла и творческой деятельности в этот возрастной период особенно актуален.

Группа участников исследования характеризовалась высоким когнитивным потенциалом (табл. 1). В данных группы отсутствовала корре-

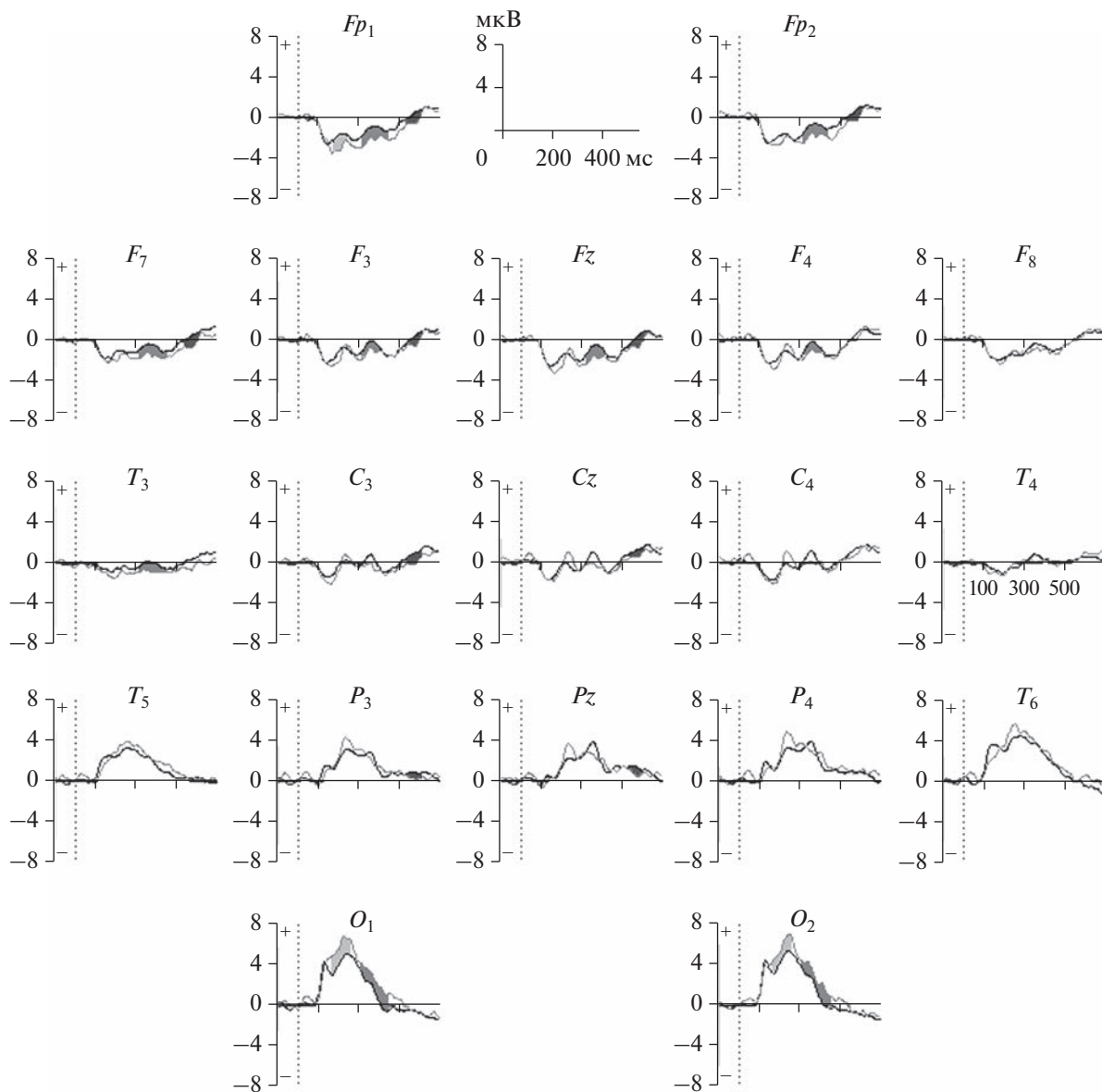


Рис. 3. Связанные с событием потенциалы (ССП) при восприятии изображений и придумывании названий к картинкам, выполненным в разной стилистике, черная линия – собственный стиль (с опорой на стилистику древних культур), серая линия – реалистичные изображения.

Fp_1 – O_2 – электроды; по оси x – время (мс), по оси y – амплитуда ССП (мкВ). Вертикальная серая пунктирная линии – начало предъявления стимула. Серая заливка разных оттенков – интервалы значимых различий.

ления между показателями “оригинальность” при выполнении на бумаге вербального [46] и невербального [48] творческих заданий и уровнем интеллекта [45], а также количеством ответов в заданиях ССП исследований. Можно предположить (“теория порога”), что творческие способности могут коррелировать с уровнем интеллекта до его определенного уровня, выше которого корреляция уже не наблюдается. В группе исследуемых нами подростков интеллект, в среднем, был выше установленного разными авторами порога IQ : 100/120 – при более “мягкой”/“строгой” оценке

оригинальности у взрослых испытуемых [57]; 115 – для подростков (14–20 лет) в зависимости от критериев “порога” [58]; 110 – для детей 11–13 лет [59].

В “сходных” условиях придумывания названий для изображений наблюдалась положительная корреляция между количеством ответов (беглость) в задачах ССП исследования – “сюжетные зарисовки”, “карикатуры”, “живопись” и показателем “абстрактность названия” в невербальном тесте Торренса, который испытуемые выполняли до начала исследования, придумывая названия к собственным изображениям. Согласно [60]

“абстрактность названия” — это показатель способности понять и передать суть проблемы, выделить или обобщить главное.

Несмотря на отсутствие поведенческих различий — общий эмоционально-положительный фон от заданий, отсутствие различий во времени, затраченном на придумывание названий к “сюжетным зарисовкам” и “карикатурам” (объективный показатель отсутствия различий в сложности заданий), были выявлены отличия в характеристиках связанных с событием потенциалов при придумывании названий к изображениям.

Также по эмоциональному фону и сложности задач не отличались “сюжетные зарисовки” и “карикатуры” от придумывания названий к изображениям из категории “живопись”, при этом время выполнения последних задач было значительно меньше, а количество ответов, в среднем — больше. По всей видимости, в условиях придумывания названий к “сюжетным зарисовкам”, “карикатурам” испытуемым было необходимо не только рассмотреть, осознать смысл визуальной метафоры, мысленно проговорить увиденное, сопоставить с собственным опытом и придумать название, т.е. дать вербальную интерпретацию понятого смысла, но и сверить его с замыслом художника, что могло сказываться на времени выполнения задания. И здесь, в определенном смысле, предложенная творческая задача сводилась к конвергентной стратегии решения — разгадке замысла художника. При восприятии же картин из категории “живопись” в ситуации работы с изображениями в авторском стиле, присутствовали все те же основные процессы, но свободы было существенно больше, так как предъявленные картины, скорее всего, представляли собой художественное повествование с элементами взаимодействия символов. Интерпретация смысла такого повествования была меньше ограничена рамками сюжета для участников.

Обсуждение результатов исследования № 1

Придумывание названий к изображениям из категорий “сюжетные зарисовки” и “карикатуры”. При сравнении придумывания названий к изображениям из категории “сюжетные зарисовки” vs “карикатуры” различия были обнаружены в двух временных интервалах. В более раннем (116–208 мс) различия регистрировались в теменных и затылочных областях, а амплитуда ССП при предъявлении изображений из категории “сюжетные зарисовки” была выше, чем при предъявлении изображений из категории “карикатуры”. Если интерпретировать выявленные различия в терминах времени возникновения компонентов ССП — P1 и N1 (чуть более поздние у подростков [61]), то они могут указывать на то, что при предъявлении

“сюжетных зарисовок” происходила большая активация зрительного внимания [62].

Ранний компонент P1 часто рассматривается в связи с начальными стадиями зрительной, но не когнитивной обработки стимула [63], предполагают, что данный компонент генерируется дорзальной и вентральной экстрастриарной зрительной корой [64]. Амплитуда компонента P1 может модулироваться направленным вниманием (задачи детекции) к характеристикам стимула [65], однако было показано, что на нее не влияет визуальная сложность художественного изображения [66]. В нашем исследовании “сюжетные зарисовки” и “карикатуры” в общей совокупности отличались по визуальным характеристикам, которые, как мы предполагали, должны были влиять на различия в амплитуде ранних компонентов. Временная же последовательность латентностей компонентов ССП, также как время нахождения ответа, и количество ответов между этими стимулами не различалось.

В более позднем интервале различий (492–656 мс) амплитуда ССП при придумывании названий к “сюжетным зарисовкам” была выше, чем при придумывании названий к изображениям из категории “карикатуры”. Эффект наблюдался во всех отведениях, за исключением височных зон правого полушария и затылочных областей билатерально. Выявленные отличия укладываются во временной интервал компонента P600, который связывают с процессами анализа и понимания иронии в тексте [67], с семантической обработкой [23, 24], а применительно к восприятию зрительных образов — с возможной неконгруэнтностью увиденного [68]. По всей видимости, работа именно с изображениями “сюжетных зарисовок” требовала от испытуемых более “глубокого” исследования заложенной автором метафоры для ее вербальной интерпретации.

Различия, связанные с нахождением ответа в сравнении с ненахождением ответа в творческой задаче, были выявлены на интервале 1300–1650 мс (за более чем 1500 мс до среднего времени обозначения ответа ~3000 мс) в лобных, центральных и теменных отведениях и характеризовались меньшей амплитудой при наличии ответа. При решении инсайтных задач в ССП исследовании [69] большая негативность на позднем интервале (1100–1300 мс, при среднем времени реакции 2600 мс) связывалась авторами со “сломом ментальных установок” и формированием новых представлений. В нашем исследовании можно предположить, что ответ был найден в том случае, когда испытуемому, в том числе, удалось взглянуть по-новому на предъявленное изображение, понять визуальную метафору и сопоставить свое суждение с предполагаемым автором смыслом.

Обсуждение результатов исследования № 2

Придумывание названий к картинам, выполненным в авторском и реалистичном стиле. Различия ССП при придумывании названий к картинам в “авторском стиле” в сравнении с картинами этого же художника, выполненными в “реалистичном” стиле были выявлены в трех временных интервалах. Ранних отличий, которые могли бы быть соотнесены с различиями зрительного внимания (P1/N1), в данном случае выявлено не было. Написанные одним художником картины (независимо от стиля), по всей видимости, задействовали одинаковый уровень непроизвольного зрительного внимания.

Первые различия в этом исследовании проявляются позднее (152–264 мс) и соотносятся с временным интервалом компонента P2(00) зрительных ССП. Амплитуда ССП в данном интервале была меньше в затылочных отведениях билатерально и менее негативна в лобном отведении левого полушария для “изображений в авторском стиле” в сравнении с “реалистичным”. В этом интервале разница амплитуд ССП уже рассматривается в связи с формированием эстетических суждений при восприятии произведений искусства. Так, в исследовании [70] амплитуда теменного P200 (во временном интервале 190–250 мс) была ниже при восприятии нравящегося дизайна керамических плиток. При этом в ситуации рассмотрения произведений живописи [71], респондентами без опыта в искусстве в сравнении с профессионалами, амплитуда теменного компонента P200 (160–230 мс) зрительных ССП у первых была ниже.

В интервале 308–440 мс при придумывании названий к картинам в авторском стиле амплитуда положительной волны ССП в затылочных отведениях была меньше, а в лобных отведениях амплитуда негативного отклонения ССП была менее негативной в сравнении с изображениями в реалистичном стиле. Различия, вероятно, могут быть связаны с имплицитным (без специальной инструкции) восприятием стилистических особенностей изображения и началом семантического анализа. Согласно исследованиям [72, 73] обработка стилистических особенностей живописного произведения может начинаться позже и осуществляется дольше, чем категоризация содержания. В условиях эксплицитного (заданного инструкции) различения стилей и содержания картин (портреты, пейзажи), информация о стилистических особенностях изображения становилась “доступной” на ~224 мс (*Go-NoGo* парадигма), что было на 40–90 мс позже, чем информация о содержании [73].

В нашем исследовании задачи различать стили изображения не ставилось, поэтому отличия амплитуд связанных с событием потенциалов, свя-

занные с оценкой стилистических особенностей могут быть более поздними и включать и когнитивный компонент восприятия визуальных символов.

В более позднем интервале (544–600 мс) при придумывании названий к картинам в авторском стиле в сравнении с выполнением творческой задачи по отношению к реалистичным изображениям, амплитуда ССП была выше в лобных, височных и центрально-теменных отведениях с акцентом в левом полушарии. Эти результаты подобны полученным в первом исследовании данным о большей амплитуде поздней позитивности (для “сюжетных зарисовок”), связанной с вероятной оценкой метафорического смысла изображений.

В обоих исследованиях поздние различия с латентностью около ~600 мс (по аналогии с эффектами, выявленными для вербальных метафор [23, 24]) могут быть соотнесены с вычленением и анализом визуальных метафор и символов в изображениях для создания названия картины.

Придумывание названия к изображению являлось для испытуемых творческой задачей. Предварительный контент-анализ ответов подростков продемонстрировал, что названия изображений включали в себя либо художественное описание (например, “родное место”, “летний вечер”), отражение основного воспринятого эмоционального содержания (например, “счастье бытия”), или абстрактной идеи (например, “скоротечное время”). Участники давали ответы, демонстрировавшие поиск метафорического содержания изображений.

Наши результаты могут быть сопоставлены с немногочисленными ССП исследованиями, вовлекающими испытуемых в решение дивергентных и инсайтных задач [50, 69], восприятие вербальных метафор или оригинальных способов использования предметов [74–76]. Так при восприятии новых метафор (*vs* буквальные фразы) или восприятии новых способов употребления привычных предметов наблюдалась большая амплитуда поздних компонентов связанных с событием потенциалов (после 500 мс) в группе с более высоким уровнем оригинальности [76]. В нашем исследовании, извлечение метафорического и символического смысла для создания собственного названия картины сопровождалось большей амплитудой в интервале 492–656 мс при восприятии сюжетных зарисовок и в интервале 544–600 мс при восприятии “живописи” в авторском стиле.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенных исследований были выявлены особенности ССП при восприятии и придумывании названий к картинам современных

художников, содержащих метафорический и символический смысл. Работа включала в себя два взаимодополняющих исследования: первое — исследование восприятия метафорических и карикатурных изображений, придумывание названий к которым, предположительно, являлось конвергентной задачей и базировалось на понимании/разгадывании заложенной автором метафоры. Второе — исследование восприятия живописных картин, выполненных в авторском стиле, содержащих символы и метафоры, и картин в реалистичном стиле, содержащих мало символов. В этом исследовании придумывание названий к картинам являлось более открытой — дивергентной творческой задачей.

Выявленные в исследованиях ранние отличия связанных с событием потенциалов (116–208 мс — в первом и 152–264 мс — во втором исследовании) по всей видимости, могут быть соотнесены со зрительным вниманием и визуальными особенностями изображений (живопись “сюжетные зарисовки”/графика “карикатуры”) — в первом случае и начальными эстетическими суждениями “авторский стиль” — во втором. В более позднем временном интервале (308–440 мс) при выполнении дивергентной творческой задачи и придумывании названий к картинам в “авторском” стиле из категории “живопись”, по-видимому, у испытуемых происходила имплицитная оценка стилевых особенностей (авторский/реалистичный стиль) изображения и вычленение символических образов. Различия наблюдались в лобных зонах коры с акцентом в левом полушарии.

В обоих исследованиях наблюдалась большая амплитуда поздней положительной волны связанных с событием потенциалов (492–656 мс — в первом исследовании и 544–600 мс — во втором исследовании) при придумывании названий к изображениям (“сюжетные зарисовки” и “живопись в авторском стиле” соответственно), содержащим скрытые визуальные метафоры и символы.

При решении конвергентной творческой задачи (исследование № 1) нахождение ответа (по сравнению с отсутствием), сопровождалось меньшими значениями амплитуды ССП в интервале 1300–1650 мс. При решении дивергентной задачи (исследование № 2) — не были выявлены различия между нахождением и ненахождением ответа. Вероятно, при выполнении конвергентной творческой задачи, существенным являлся этап сравнения/сличения своих вербальных интерпретаций с содержанием визуальной метафоры и заложенным художником смыслом. В условиях же более открытой задачи этот этап мог иметь меньшее значение и перераспределялся в пользу свободного придумывания, продолжавшегося, предположительно, дольше (до принятия решения)

без видимых различий при работе со стилистически разными изображениями.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Этическим комитетом ГБ НОУ Академия талантов (Санкт-Петербург). (Протоколы № 1 от 12.09.2021 ГБ НОУ Академия талантов, № 2 от 20.09.2022 ГБ НОУ Академия талантов).

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках государственного задания № 075-0152-22-00.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Благодарности. Авторы выражают благодарность участникам исследования и художникам, предоставившим цифровые копии своих произведений для использования в исследованиях. Также авторы выражают благодарность Ю.Г. Потапову за консультативную помощь при работе с художественным материалом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fink A., Benedek M., Grabner R.H. Creativity meets neuroscience: experimental tasks for the neuroscientific study of creative thinking // *Methods*. 2007. V. 42. № 1. P. 68.
2. Luo J., Knoblich G. Studying insight problem solving with neuroscientific methods // *Methods*. 2007. V. 42. № 1. P. 77.
3. Dietrich A., Kanso R. A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight // *Psychol. Bull.* 2010. V. 136. № 5. P. 822.
4. Pidgeon L.M., Grealy M., Duffy A.H. et al. Functional neuroimaging of visual creativity: a systematic review and meta-analysis // *Brain Behav.* 2016. V. 6. № 10. P. e00540.
5. Бехтерева Н.П. Магия творчества и психофизиология. Факты, соображения, гипотезы, СПб.: Институт мозга человека РАН, 2006. 79 с.
6. Runco M.A., Jaeger G.J. The standard definition of creativity // *Creat. Res. J.* 2012. V. 24. № 1. P. 92.
7. Шемякина Н.В., Данько С.Г., Нагорнова Ж.В. и др. Динамика спектров мощности и когерентности ритмических компонентов ЭЭГ при решении вербальной творческой задачи преодоления стереотипа // *Физиология человека*. 2007. Т. 33. № 5. С. 14. Shemyakina N.V., Danko S.G., Nagornova Zh.V. et al. Changes in the power and coherence spectra of the EEG rhythmic components during solution of a verbal creative task of overcoming a stereotype // *Human Physiology*. 2007. V. 33. № 5. P. 524.
8. Shemyakina N.V., Nagornova Z.V. EEG “Signs” of Verbal Creative Task Fulfillment with and without Overcoming Self-Induced Stereotypes // *Behav. Sci.* 2019. V. 10. № 1. P. 17.

9. Camarda A., Salvia É., Vidal J. et al. Neural basis of functional fixedness during creative idea generation: An EEG study // *Neuropsychologia*. 2018. V. 118. Pt. A. P. 4.
10. Sternberg R.J. The Nature of Creativity // *Creat. Res. J.* 2006. V. 18. № 1. P. 87.
11. Bechtereva N.P. The usefulness of psychophysiology in the maintenance of cognitive life // *Int. J. Psychophysiol.* 2009. V. 73. № 2. P. 83.
12. Mednick S.A. The associative basis of the creative process // *Psychol. Rev.* 1962. V. 69. P. 220.
13. Benedek M., Neubauer A.C. Revisiting Mednick's Model on Creativity-Related Differences in Associative Hierarchies. Evidence for a Common Path to Uncommon Thought // *J. Creat. Behav.* 2013. V. 47. № 4. P. 273.
14. Abraham A. Creative thinking as orchestrated by semantic processing vs. cognitive control brain networks // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 95.
15. Гилфорд Дж. Три стороны интеллекта / Психология мышления. М.: Прогресс, 1965. 534 с.
16. Kenett Y.N., Gold R., Faust M. Metaphor Comprehension in Low and High Creative Individuals // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. P. 482.
17. Marinkovic K., Baldwin S., Courtney M.G. et al. Right hemisphere has the last laugh: neural dynamics of joke appreciation // *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2011. V. 11. № 1. P. 113.
18. Perchtold-Stefan C.M., Fink A., Rominger C., Papousek I. Motivational Factors in the Typical Display of Humor and Creative Potential: The Case of Malevolent Creativity // *Front. Psychol.* 2020. V. 11. P. 1213.
19. Javaid S.F., Pandarakalam J.P. The Association of Creativity with Divergent and Convergent Thinking // *Psychiat. Danub.* 2021. V. 33. № 2. P. 133.
20. Vartanian O. Dissociable neural systems for analogy and metaphor: implications for the neuroscience of creativity // *Br. J. Psychol.* 2012. V. 103. № 3. P. 302.
21. Brawer J., Amir O. Mapping the 'funny bone': neuro-anatomical correlates of humor creativity in professional comedians // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2021. V. 16. № 9. P. 915.
22. Lu A., Zhang J.X. Event-related potential evidence for the early activation of literal meaning during comprehension of conventional lexical metaphors // *Neuropsychologia*. 2012. V. 50. № 8. P. 1730.
23. Bambini V., Bertini C., Schaeken W. et al. Disentangling Metaphor from Context: An ERP Study // *Front. Psychol.* 2016. V. 7. P. 559.
24. Rataj K., Przekoracka-Krawczyk A., van der Lubbe R.H.J. On understanding creative language: The late positive complex and novel metaphor // *Brain Res.* 2018. V. 1678. P. 231.
25. Cardillo E.R., Watson C.E., Schmidt G.L. et al. From novel to familiar: tuning the brain for metaphors // *Neuroimage*. 2012. V. 59. № 4. P. 3212.
26. Jończyk R., Kremer G.E., Siddique Z., van Hell J.G. Engineering creativity: Prior experience modulates electrophysiological responses to novel metaphors // *Psychophysiology*. 2020. V. 57. № 10. P. e13630.
27. Melogno S., Pinto M.A., Pollice C. et al. Understanding Novel Metaphors: A Milestone in the Developmental Trajectory of Children with Agenesis of the Corpus Callosum? // *Brain Sci.* 2020. V. 10. № 10. P. 10753.
28. Hartung F., Kenett Y.N., Cardillo E.R. et al. Context matters: Novel metaphors in supportive and non-supportive contexts // *Neuroimage*. 2020. V. 212. P. 116645.
29. Никитина С.Е., Васильева Н.В. Экспериментальный системный толковый словарь стилистических терминов / Принципы составления и избранные словарные статьи. М.: РАН, Ин-т языкознания, 1996. 93 с.
30. Ожегов С.И., Шведова Н.Ю. Толковый словарь русского языка. М.: ООО "А ТЕМП", 2006. 353 с.
31. Sun L., Chen H., Zhang C. et al. Decoding brain activities of literary metaphor comprehension: An event-related potential and EEG spectral analysis // *Front. Psychol.* 2022. V. 13. P. 913521.
32. Ma Q., Hu L., Xiao C. et al. Neural correlates of multimodal metaphor comprehension: Evidence from event-related potentials and time-frequency decompositions // *Int. J. Psychophysiol.* 2016. V. 109. P. 81.
33. Adamczyk P., Jáni M., Ligeza T.S. et al. On the Role of Bilateral Brain Hypofunction and Abnormal Lateralization of Cortical Information Flow as Neural Underpinnings of Conventional Metaphor Processing Impairment in Schizophrenia: An fMRI and EEG Study // *Brain Topogr.* 2021. V. 34. № 4. P. 537.
34. Deckert M., Schmoeger M., Geist M. et al. Electrophysiological correlates of conventional metaphor, irony, and literal language processing – An event-related potentials and eLORETA study // *Brain Lang.* 2021. V. 215. P. 104930.
35. Bardolph M., Coulson S. How vertical hand movements impact brain activity elicited by literally and metaphorically related words: an ERP study of embodied metaphor // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 1031.
36. Casasanto D., de Bruin A. Metaphors we learn by: Directed motor action improves word learning // *Cognition*. 2019. V. 182. P. 177.
37. Yang J., Shu H. Involvement of the Motor System in Comprehension of Non-Literal Action Language: A Meta-Analysis Study // *Brain Topogr.* 2015. V. 29. № 1. P. 94.
38. Diaz M.T., Eppes A. Factors Influencing Right Hemisphere Engagement During Metaphor Comprehension // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. P. 414.
39. Sotillo M., Carretié L., Hinojosa J.A. et al. Neural activity associated with metaphor comprehension: spatial analysis // *Neurosci. Lett.* 2005. V. 373. № 1. P. 5.
40. Lee S.S., Dapretto M. Metaphorical vs. literal word meanings: fMRI evidence against a selective role of the right hemisphere. // *NeuroImage*. 2006. V. 29. № 2. P. 536.
41. Rapp A.M., Leube D.T., Erb M. et al. Neural correlates of metaphor processing. // *Cogn. Brain Res.* 2004. V. 20. № 3. P. 395.
42. Schmidt G.L., Seger C.A. Neural correlates of metaphor processing: the roles of figurativeness, familiarity and difficulty // *Brain Cogn.* 2009. V. 71. № 3. P. 375.
43. García-Madariaga J., Moya I., Recuero N., Blasco M.F. Revealing Unconscious Consumer Reactions to Advertisements That Include Visual Metaphors. A Neuro-

- physiological Experiment // *Front. Psychol.* 2020. V. 12. № 11. P. 760.
44. Wang R.W.Y., Liu I.N. Temporal and electroencephalography dynamics of surreal marketing // *Front. Neurosci.* 2022. V. 16. P. 949008.
45. Raven J., Raven J. Raven Progressive Matrices / Handbook of nonverbal assessment. Kluwer Academic // Ed. McCallum R.S. Plenum Publishers, 2003. P. 223.
46. Mednick T., Mednick F.M. Creative Thinking and Level of Intelligence // *J. Creat. Behav.* 1967. V. 1. P. 428.
47. Воронин А.Н., Галкина Т.В. Диагностика вербальной креативности (адаптация теста Медника) // *Методы психологической диагностики.* 1994. № 2. С. 40.
48. Туник Е.Е. Диагностика креативности. Тест Е. Торренса / Адаптированный вариант. СПб.: Речь, 2006. С. 176.
49. Shemyakina N.V., Nagornova Zh.V. Event-Related Changes In EEG Spectral Power Corresponding to Creative and Trivial Decisions // *Russ. J. Physiol.* 2020. V. 106. № 7. P. 880.
50. Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В. Действительно ли инструкция “быть оригинальным и придумывать” влияет на ЭЭГ-корреляты выполнения творческих задач? // *Физиология человека.* 2020. Т. 46. № 6. С. 5. Shemyakina N.V., Nagornova Zh.V. Does the instruction “be original and create” actually affect the EEG correlates of performing creative tasks? // *Human Physiology.* 2020. V. 46. № 6. P. 587.
51. Нагорнова Ж.В., Галкин В.А., Васенькина В.А. и др. Нейрофизиологические характеристики придумывания альтернативного использования по данным анализа вызванных потенциалов (ВП) и связанной с событиями синхронизации/десинхронизации ЭЭГ в зависимости от уровня продуктивности и оригинальности испытуемых // *Физиология человека.* 2022. Т. 48. № 6. С. 3. Nagornova Zh.V., Galkin V.A., Vassen'kina V.A. Neurophysiological Characteristics of Alternative Uses Task Performance by Means of ERP and ERS/ERD Data Analysis Depending on the Subject's Productivity and Originality Levels // *Human Physiology.* 2022. V. 48. № 6. P. 609.
52. Vigario R.N. Extraction of ocular artefacts from EEG using independent component analysis // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1997. V. 103. № 3. P. 395.
53. Jung T.P., Makeig S., Westerfield M. et al. Removal of eye activity artifacts from visual event-related potentials in normal and clinical subjects // *Clin. Neurophysiol.* 2000. V. 111. № 10. P. 1745.
54. Терещенко Е.П., Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д., Мюллер А. Сравнение эффективности различных методов удаления артефактов морганий при анализе количественной электроэнцефалограммы и вызванных потенциалов // *Физиология человека.* 2009. Т. 35. № 2. С. 124. Tereshchenko E.P., Ponomarev V.A., Kropotov Yu.D., Müller A. Comparative efficiencies of different methods for removing blink artifacts in analyzing quantitative electroencephalogram and event-related potentials // *Human Physiology.* 2009. V. 35. № 2. P. 241.
55. Libet B., Gleason C.A., Wright E.W., Pearl D.K. Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act // *Brain.* 1983. V. 106. Pt. 3. P. 623.
56. Zhu X., Oh Y., Chesebrough C. et al. Pre-stimulus brain oscillations predict insight versus analytic problem-solving in an anagram task. // *Neuropsychologia.* 2021. V. 162. P. 108044.
57. Jauk E., Benedek M., Dunst B., Neubauer A.C. The relationship between intelligence and creativity: New support for the threshold hypothesis by means of empirical breakpoint detection // *Intelligence.* 2013. V. 41. № 4. P. 212.
58. Karwowski M., Gralewski J. Threshold hypothesis: Fact or artifact? // *Think Skills Creat.* 2013. V. 8. № 1. P. 25.
59. Shi B., Wang L., Yang J. et al. Relationship between Divergent Thinking and Intelligence: An Empirical Study of the Threshold Hypothesis with Chinese Children // *Front. Psychol.* 2017. V. 8. P. 254.
60. Torrance E.P. The Torrance Tests of Creative Thinking-Norms-Technical Manual Research Edition-Verbal Tests, Forms A and B-Figural Tests, Forms A and B. Personnel Press, 1966.
61. Taylor M.J., Batty M., Itier R.J. The faces of development: a review of early face processing over childhood // *J. Cogn. Neurosci.* 2004. V. 16. № 8. P. 1426.
62. Koivisto M., Revonsuo A. Event-related brain potential correlates of visual awareness // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2010. V. 34. № 6. P. 922.
63. Rugg M.D., Coles M.G.H. Electrophysiology of mind / Event-Related Brain Potentials and Cognition. Oxford, UK, 1995. P. 40.
64. Di Russo F., Martinez A., Sereno M.I. et al. Cortical sources of the early components of the visual evoked potential // *Hum. Brain Mapp.* 2002. V. 15. № 2. P. 95.
65. Zhang W., Luck S.J. Feature-based attention modulates feedforward visual processing // *Nat. Neurosci.* 2009. V. 12. № 1. P. 4.
66. Hu R., Zhang L., Meng P. et al. The Neural Responses of Visual Complexity in the Oddball Paradigm: An ERP Study // *Brain Sci.* 2022. V. 12. № 4. P. 447.
67. Weissman B., Tanner D. A strong wink between verbal and emoji-based irony: How the brain processes ironic emojis during language comprehension // *PLoS One.* 2018. V. 13. № 8. P. e0201727.
68. Markey P.S., Jakesch M., Leder H. Art looks different – Semantic and syntactic processing of paintings and associated neurophysiological brain responses // *Brain Cogn.* 2019. V. 134 P. 58.
69. Luo J., Li W., Fink A. et al. The time course of breaking mental sets and forming novel associations in insight-like problem solving: an ERP investigation // *Exp. Brain Res.* 2011. V. 212. № 4. P. 583.
70. Chen J., Cheng Y. The relationship between aesthetic preferences of people for ceramic tile design and neural

- responses: An event-related potential study // *Front. Hum. Neurosci.* 2022. V. 16. P. 994195.
71. *Fudali-Czyż A, Francuz P, Augustynowicz P.* The effect of art expertise on eye fixation-related potentials during aesthetic judgment task in focal and ambient modes // *Front. Psychol.* 2018. V. 16. № 9. P. 1972.
 72. *Augustin M.D., Leder H., Hutzler F., Carbon C.C.* Style follows content: On the microgenesis of art perception // *Acta Psychol.* 2008. V. 128. № 1. P. 127.
 73. *Augustin M.D., DeFranceschi B., Fuchs H.K. et al.* The neural time course of art perception: an ERP study on the processing of style versus content in art // *Neuropsychologia.* 2011. V. 49. № 7. P. 2071.
 74. *Rutter B., Kröger S., Hill H. et al.* Can clouds dance? Part 2: an ERP investigation of passive conceptual expansion // *Brain Cogn.* 2012. V. 80. № 3. P. 301.
 75. *Kröger S., Rutter B., Hill H. et al.* An ERP study of passive creative conceptual expansion using a modified alternate uses task // *Brain Res.* 2013. V. 1527. P. 189.
 76. *Abraham A., Rutter B., Hermann C.* Conceptual expansion via novel metaphor processing: an ERP replication and extension study examining individual differences in creativity // *Brain Lang.* 2021. V. 221. P. 105007.

Neurophysiological Characteristics of “Transferring” the Metaphorical Meaning of Images Into Original Titles

Zh. V. Nagornova^{a, *}, V. A. Galkin^a, N. V. Shemyakina^a

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*}*E-mail: nagornova_zh@mail.ru*

In the ERP study we aimed to find differences between creating titles for artistic images distinguishing by their meaning and stylistics. Thirty six adolescents (16 m; 20 f. Mean age: 15.9 ± 1.1 years) took part in two studies. Images from three categories – “cartoons”, “plot sketches”, “paintings” – full of metaphors and symbols were used as the stimuli. We considered creating titles for “cartoons” and “plot sketches” of modern artists as convergent creative task based on guessing of artists thought, at the same time the task – creating the titles for “paintings” was considered by us as more open and divergent creative task. During creating titles ERP’s amplitude for the “plot sketches” vs “cartoons” was higher in parietal-occipital and frontal, central, parietal areas on intervals 116–208 and 492–656 ms respectively. During creating titles for the paintings in the author’s style vs realistic paintings differences in ERP’s amplitude were found in occipital areas (152–264 ms), frontal and occipital areas bilateral (208–440 ms) and in frontal, temporal, central, parietal areas with maximum in the left hemisphere (544–600 ms). Late positive wave with different latency, was found in two studies – “plot sketches” vs “cartoons” (492–656 ms) and – “author’s style” vs realistic images (544–600 ms) and suggested to be connected with the extraction and analysis of the metaphorical meaning and symbols in the images for creating of the verbal interpretation (title). Only in performing a convergent creative task (closely related to the interpretation of the artist’s idea), finding the answer was accompanied by a smaller amplitude of late differences in the interval of 1300–1650 ms (more than 1500 ms before the moment when the answer was marked as have been found), while there were no significant differences between finding and not finding the answer in the second study. With the same task and in the conditions of finding/not finding the answer, we assumed that in the first study a process of comparing one’s own ideas with a certain desired (laid down by the author) meaning, that was expressed more strongly than in the second study, was needed.

Keywords: event-related potentials (ERP), images, visual metaphors, plot sketches, cartoons, painting, verbal creativity, adolescents.

УДК 612.822

СВЯЗАННЫЕ С СОБЫТИЯМИ ПОТЕНЦИАЛЫ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА ПРИ СРАВНЕНИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ СТИМУЛОВ

© 2023 г. И. С. Никишена¹, *, В. А. Пономарев¹, Ю. Д. Кропотов¹

¹ФГБУН Институт мозга человека имени Н.П. Бехтеревой РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: nikishena@mail.ru

Поступила в редакцию 14.11.2022 г.

После доработки 30.01.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Целью данного исследования было изучение особенностей работы мозга при сравнении зрительных стимулов в условиях отсроченной двигательной реакции. Исследовались потенциалы, связанные с событиями (ПСС), у 84 здоровых испытуемых в трехстимульном тесте, первые два стимула представляли собой пару сравнения, третий стимул запускал ответную двигательную реакцию. После предъявления второго стимула регистрировался комплекс из двух волн с затылочной (O_z , наиболее выраженный в интервале 100–150 мс) и задневисочной локализацией (P_7 , P_8 , 190–270 мс); отрицательное колебание в лобных отделах (F_z , 240–300 мс) и положительное колебание в теменных отделах (P_z , 270–450 мс). Ответы мозга различались по амплитуде в случае совпадения и несовпадения зрительных стимулов. В статье обсуждается физиологическое значение указанных волн и их различий в двух условиях.

Ключевые слова: рабочая память, восприятие, прайминг, связанные с событиями потенциалы (ПСС).

DOI: 10.31857/S0131164622600902, **EDN:** GHALKW

Сравнение свойств объектов окружающего мира является базовой функцией мозга человека и животных. Такие сравнения выполняются мозгом как при тщательном анализе объектов, так и при быстром оперативном решении текущей задачи. Причем, в последнем случае часто выполняется сравнение объектов, которые появляются в окружающей среде последовательно. Подобная ситуация может быть смоделирована в экспериментальных условиях, когда человеку последовательно на относительно короткое время предъявляются какие-либо пары стимулов. В частности, для зрительной модальности это могут быть пары изображений объектов. Такая экспериментальная парадигма часто используется для исследования мозговых механизмов восприятия, внимания, памяти и других [1–3].

Связанные с событиями потенциалы (ПСС) широко применяются в исследованиях, использующих эту экспериментальную парадигму. Был выявлен ряд феноменов ПСС, в которых отражается протекание мозговых процессов, связанных с восприятием зрительных стимулов, их сравнением, вниманием к их характеристикам и, наконец, выполнением ответной реакции [4]. В частности, при сравнении пар последовательно предъявляемых и различающихся по одному или нескольким признакам стимулов наблюдаются волна поло-

жительной полярности с максимумом в височно-затылочных отделах [5–9] и волна отрицательной полярности с максимумом в передних отделах [10, 11]. Предполагается, что первая волна связана с процессами сравнения предъявляемого изображения и образа, хранящегося в рабочей памяти [12], напротив, вторую волну часто связывают с процессами подавления ответа [13, 14] или обнаружения конфликта, с торможением и пересмотром программы действия перед двигательной реакцией [15–19].

В этих экспериментах обычно используется двустимульная парадигма, в которой ответная реакция испытуемого выполняется сразу после предъявления второго стимула. Хорошо известно, что при выполнении двигательной реакции (или ее подавлении) в интервале 200–400 мс в теменно-центральных областях наблюдается широко распространенная на поверхности головы волна положительной полярности, так называемая волна P_3 [20]. Эта волна относительно большой амплитуды накладывается на другие волны ПСС, тем самым маскируя эффекты, связанные с восприятием и сравнением стимулов.

Возможным решением, позволяющим хотя бы частично уменьшить влияние волны P_3 (ответа мозга, связанного с двигательной реакцией), является задержка ответа испытуемого [21]. Для

этого после предъявления каждой пары стимулов через небольшой интервал (например, 1 с) предъявляется дополнительный, так называемый, разрешающий сигнал, только после которого испытуемый должен выполнять ответную двигательную реакцию. Несмотря на то, что такой экспериментальный прием используется в исследованиях ПСС, заранее неизвестно, будет ли он эффективен в случае сравнения зрительных стимулов.

Целью настоящего исследования было изучение особенностей работы мозга при сравнении зрительных стимулов в задаче с отсроченной двигательной реакцией.

В настоящей статье представлены результаты исследований, полученных при сравнении ПСС при предъявлении двух последовательно предъявляемых изображений объектов материального мира на экране монитора. Задачей испытуемого было запомнить первый стимул и сравнить со вторым. Волонтеру следовало удержаться от двигательной реакции до предъявления разрешающего стимула. Авторы предположили, что такой дизайн эксперимента позволит разделить компоненты, связанные с восприятием и сравнением стимула от ответов мозга, имеющих отношение к организации двигательной реакции. Чтобы проверить эту гипотезу, основной фокус интереса был направлен на события, регистрируемые в интервале между вторым и третьим стимулом, и предшествующие ответной реакции.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 84 волонтера в возрасте 18–49 лет (мужского пола – 12, женского пола – 72). Все праворукие. На основании предварительного анкетирования в группу испытуемых были включены люди, соответствующие нижеперечисленным требованиям: 1) отсутствие неврологических и психиатрических заболеваний, травм мозга, судорожной активности в анамнезе, 2) отсутствие нарушений слуха, нормальное или скорректированное зрение, 3) отсутствие медикаментозной терапии на момент исследования.

Во время исследования участник сидел в кресле перед монитором, на котором на белом фоне в центре экрана предъявляли стимулы в зрительной модальности – изображения с угловыми размерами порядка 3.8° предъявляли со средним контрастом, позволяющим распознавать их без затруднений. Между презентациями изображений на экране демонстрировали белый фон, чтобы избежать мигания экрана монитора. Освещенность на уровне глаз испытуемого была около 300 лк. Для предъявления стимулов в формате *.bmp использовали программу *Psytask*.

Стимульный материал. В качестве стимулов применяли черно-белые изображения объектов материального мира (всего 31), найденные в интернет-сети в свободном доступе.

Тест состоял из 200 проб. Проба включала три последовательных стимула (рис. 1): “картинка”, “картинка”, графическое изображение точки, вариантов проб – 78. В каждой пробе после предъявления точки волонтеру следовало нажимать как можно быстрее либо указательным пальцем правой руки на левую кнопку, либо средним пальцем правой руки на правую кнопку в случаях предъявления пары одинаковых или разных изображений, соответственно. Пробы подавали в случайном порядке с вероятностью 50%. Длительность одной пробы – 3500 мс, престаимulusный интервал перед первым стимулом – 300 мс, второй стимул в паре – 1400 мс, стимул “точка”, разрешающий ответную реакцию, подавали через 2400 мс от начала пробы, интервал задержки между пробами – 100 мс. Общая продолжительность теста – 12 мин.

Пробы, в которых испытуемые неправильно выполняли задание, исключали из анализа. “Неправильными ответами” считались ошибки на совпадение или несовпадение стимулов, и ответы, выполняемые слишком быстро: до момента времени 50 мс после предъявления третьего стимула. Перед началом исследования волонтерам предоставляли несколько десятков проб для тренировки. Для тренировочной сессии был взят фрагмент тестового задания.

Для записи электроэнцефалограммы (ЭЭГ) был использован электроэнцефалограф “Мицар-ЭЭГ-202” (Россия). Электроды располагали на поверхности головы в соответствии с международной системой 10–10, всего 31 электрод: Fp_1 ; Fpz ; Fp_2 ; F_7 ; F_3 ; F_z ; F_4 ; F_8 ; FT_7 ; FC_3 ; FC_z ; FC_4 ; FT_8 ; T_7 ; C_3 ; C_z ; C_4 ; T_8 ; TP_7 ; CP_3 ; CP_z ; CP_4 ; TP_8 ; P_7 ; P_3 ; P_z ; P_4 ; P_8 ; O_1 ; O_z ; O_2 . Референтные электроды крепили на мочки ушей. Заземляющий электрод располагали в проекции отведения Fpz . Сопротивление электродов не превышало 5 кОм. Частота квантования сигналов составляла 250 Гц. Параметры фильтров верхних (ФВЧ) и низких частот (ФНЧ) – 0.53 Гц ($\tau = 0.3$ с) и 50 Гц соответственно. Сетевую электромагнитную помеху подавляли с помощью цифрового режекторного фильтра с полосой пропускания 45–55 Гц.

Полученные в ходе исследования цифровые записи ЭЭГ обрабатывали при помощи программы *WinEEG*. Коррекцию артефактов моргания выполняли с помощью метода, предложенного R.N. Vigário [22], использующего разложение на независимые компоненты. На следующем этапе исключали пробы, содержащие артефакты. В частности, было подобрано опытным путем так, чтобы пробы, в которых (1) потенциалы более 50 мкВ для электродов Fp_1 и Fp_2 и более 100 мкВ для

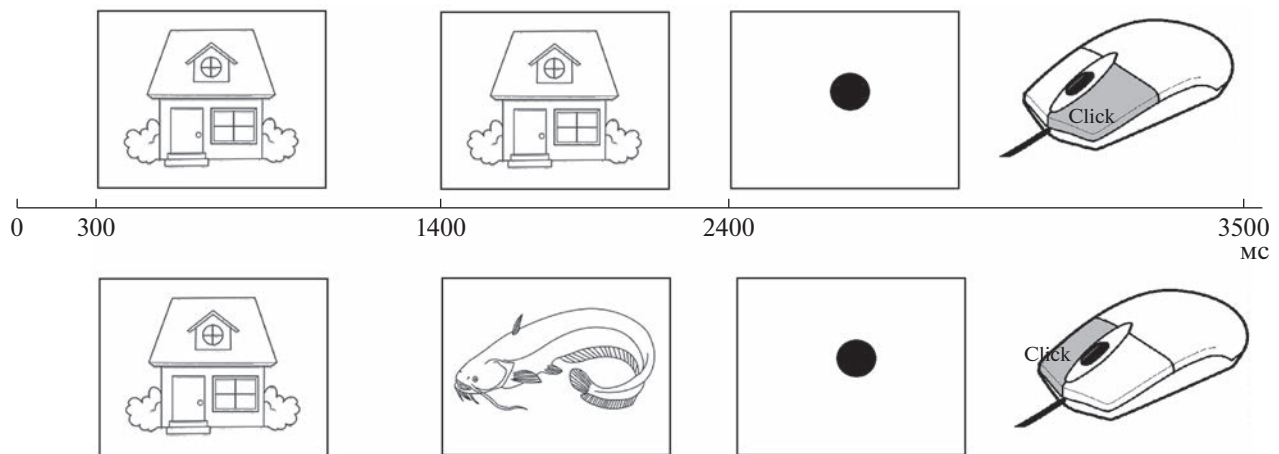


Рис. 1. Схематическое изображение теста. Объяснения см. в тексте.

остальных электродов; (2) медленные волны в диапазоне от 0.53 до 1 Гц, с амплитудой более 50 мкВ; (3) быстрые колебания сигнала в интервале частот от 20 до 35 Гц, с амплитудой более 35 мкВ, содержали артефакты.

ПСС были вычислены отдельно для каждого условия и каждого испытуемого методом усреднения. Записи ЭЭГ, которые после удаления артефактов и исключения ошибок выполнения задания (“неправильные ответы”) состояли из 30 и менее проб, не участвовали в дальнейшем анализе.

ПСС рассчитывали для трех вариантов сигналов: исходной ЭЭГ относительно среднего потенциала референтных ушных электродов, ЭЭГ к стандартизованному референту (*REST – reference electrode standardization technique*) [23, 24], и ЭЭГ, преобразованной к, так называемой, плотности источников тока [25]. Преимуществом последних двух преобразований ЭЭГ является то, что на основе физической модели головы, в первом случае, вычисляются сигналы, соответствующие референту, расположенному на “бесконечности” [23], а во втором случае, рассчитывается нормальная по отношению к поверхности головы составляющая тока, текущего от источников ЭЭГ к электроду [26]. Оценку плотности источников тока выполнял с помощью алгоритма, основанного на интерполяции распределения потенциалов с помощью сферических сплайнов [25], с параметрами, эмпирически подобранными для относительно редкой сетки электродов [26, 27].

Для каждого из трех вариантов сигналов ЭЭГ отдельно вычисляли усредненные по группе ПСС, и выполняли статистический анализ различий сигналов между условиями с помощью, так называемого, “основанного на кластерах анализа” [28, 29]. Преимуществом основанного на кластерах анализа, по сравнению с традиционно ис-

пользуемыми методами, является то, что при этом автоматически (без участия человека) выполняется поиск областей интереса (кластеров), включающих в себя однонаправленные достаточно выраженные различия ($p < 0.05$ в соответствии с *W*-критерием Вилкоксона) сигналов ПСС между условиями, расположенных в непосредственной близости друг от друга как во времени, так и в пространстве. В результате этого поиска, обычно, выделяется небольшое число кластеров, для каждого из которых выполняются статистические оценки, что позволяет снизить размерности исходных данных и эффективно решить проблему множественных проверок статистических гипотез. Оценка статистической значимости различий сигналов в кластере выполняется путем многократного (в нашем случае – 10000 раз) случайного перемешивания данных (в нашем случае – условий), и вычисления вероятности наблюдения кластеров со статистическими характеристиками в этих искусственно синтезированных данных, такими же, как в исходных данных. В результатах описаны только те кластеры, вероятность наблюдения которых в искусственно синтезированных данных была меньше 0.001.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЯ

Поведенческие показатели. Количество “неправильных ответов” в пробах с совпадающими картинками – 12.25% ($SD = 15.3$), время реакции – 367 мс ($SD = 171$), количество “неправильных ответов” в пробах с несовпадающими картинками – 11.5% ($SD = 14.7$), время реакции – 366 мс ($SD = 167$).

Большое количество “неправильных ответов” было связано с тем, что многие испытуемые нажимали на кнопку до предъявления разрешаю-

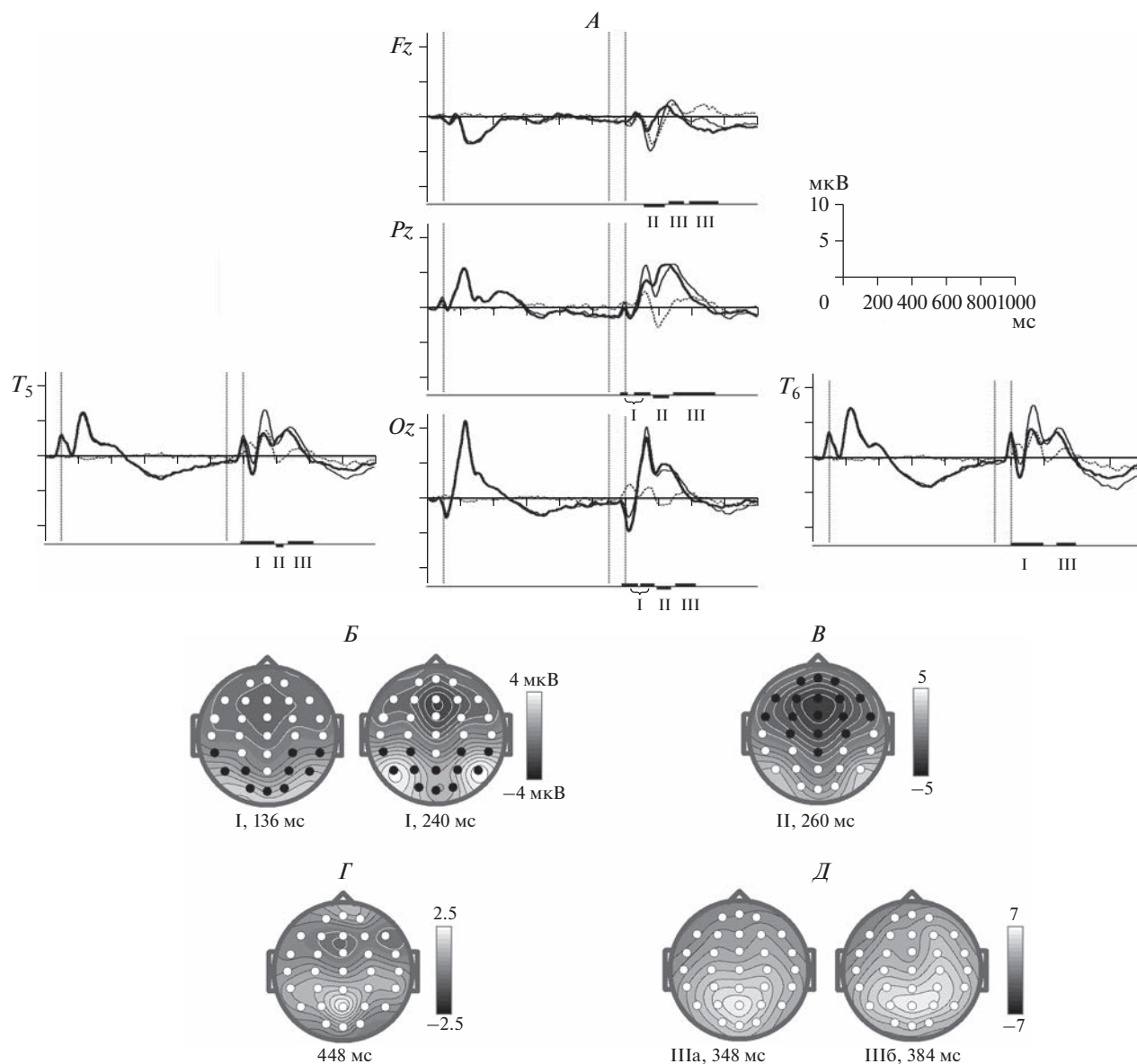


Рис. 2. Усредненные по группе связанные с событиями потенциалы (ПСС) относительно среднего потенциала референтных ушных электродов.

А — графики ПСС, по оси абсцисс — время, мс, по оси ординат — величина потенциала, мкВ, римскими цифрами под графиками указаны кластеры I, II, III. На графиках толстая линия обозначает ПСС при совпадении стимулов, тонкая линия — ПСС при несовпадении стимулов, пунктирная линия — разностная кривая потенциалов для условий “несовпадение” и “совпадение стимулов”. *Б, В* — топографии распределения разностных потенциалов для двух условий (совпадение и несовпадение). Цифры под топограммами — номер кластера и время от начала второго стимула. Маленькие круги внутри большого топографически соответствуют положение электродов. Маленькие круги, залитые черным обозначают электроды, относящиеся к кластеру. *Г, Д* — топографии распределения потенциалов после первого и второго стимулов соответственно для разных условий (IIIa — “совпадение”, IIIб — “несовпадение”). Остальные обозначения см. *Б, В*.

щего стимула. Эти ответы были исключены в соответствии с целями и задачами исследования.

Были рассмотрены компоненты потенциалов, связанных с событиями, после предъявления второго стимула в ЭЭГ относительно среднего потенциала референтных ушных электродов. Результаты представлены на рис. 2.

В интервале времени 72–292 мс можно наблюдать кластер, состоящий из двух колебаний (рис. 2, *А, Б*):

1. Отрицательное колебание в проекции височно-затылочных отделов обоих полушарий (TP_7 ; CP_4 ; TP_8 ; P_7 ; P_3 ; P_4 ; P_8 ; O_1 ; O_z ; O_2) с пиком латентного периода около 140 мс и максимумом

в Oz . По величине это колебание развивается больше при предъявлении совпадающего изображения, $p < 0.001$.

2. Положительная волна ПСС, регистрируемая в теменно-височно-затылочных отделах (TP_7 ; CP_3 ; CP_4 ; TP_8 ; P_7 ; P_3 ; Pz ; P_4 ; P_8 ; O_1 ; Oz ; O_2) с пиком около 230 мс и максимумом в P_7 ; P_8 . По величине больше при несовпадении стимулов, $p < 0.001$ (рис. 2, А, отведения P_7 ; P_8 , рис. 2, Б).

Второй кластер представлен отрицательным колебанием во временном отрезке 212–372 мс (рис. 2, А, В). Отрицательное колебание с латентным периодом около 260 мс регистрируется в лобно-височно-центральных отделах (Fp_1 ; Fpz ; Fp_2 ; F_7 ; F_3 ; Fz ; F_4 ; F_8 ; FT_7 ; FC_3 ; FCz ; FC_4 ; FT_8 ; C_3 ; Cz ; C_4 ; CPz) с максимумом в Fz . По величине больше при несовпадении стимулов, $p < 0.001$.

Третий кластер (360–768 мс) соответствует различию нисходящих фаз следующих поздних волн: положительного колебания с максимумом в Pz (рис. 2, Д), возникающего раньше по времени при совпадении стимулов, около 350 мс, и положительного колебания с латентностью около 384 мс при предъявлении несовпадающих изображений, $p < 0.001$ (аналогичное колебание после 1 стимула, без значимости, рис. 2, Г). Топографии и величина этих волн ПСС приблизительно одинаковы, а различия связаны с тем, что меняется их латентность (рис. 2, А).

При расчете ПСС в монтаже REST (рис. 3, А, Б) в интервале времени 68–320 мс можно наблюдать кластер, состоящий из двух колебаний:

1. Отрицательное колебание в проекции задне-височно-затылочных отделов обоих полушарий (TP_8 ; P_7 ; P_3 ; P_4 ; P_8 ; O_1 ; Oz ; O_2) с пиком латентного периода около 128 мс и максимумом в O_1 ; Oz ; O_2 . По величине это колебание больше при предъявлении совпадающего изображения, $p < 0.001$.

2. Положительная волна ПСС, регистрируемая в теменно-височных-затылочных отделах (TP_7 ; CP_3 ; CP_4 ; TP_8 ; P_7 ; P_3 ; P_4 ; P_8 ; O_1 ; Oz ; O_2), с пиком около 252 мс и максимумом в P_7 ; P_8 . По величине больше при несовпадении стимулов, $p < 0.001$.

Второй кластер (рис. 3, А, В) представлен отрицательным колебанием во временном отрезке 80–540 мс (по времени длиннее, чем в других монтажах). Это отрицательное колебание с латентным периодом около 260 мс, которое регистрируется в лобно-височно-центральных отделах (Fp_1 ; Fpz ; Fp_2 ; F_7 ; F_3 ; Fz ; F_4 ; F_8 ; FT_7 ; FC_3 ; FCz ; FC_4 ; FT_8 ; C_3 ; Cz ; C_4 ; CPz) (полностью совпадает с другими монтажами). По величине больше при несовпадении стимулов, $p < 0.001$.

Третий кластер соответствует различию следующих поздних волн: положительного колебания с максимумом в Pz (рис. 3, А, Д), возникающего

раньше по времени при совпадении стимулов, около 324 мс, и положительного колебания около 404 мс при предъявлении несовпадающих изображений, $p < 0.001$ (аналогичное колебание регистрировалось после 1 стимула, без значимости, рис. 3, Г). Топографии и величина этих волн ПСС приблизительно одинаковы, а различия связаны с тем, что меняется их латентность (рис. 3, Д). Третий кластер включает максимумы волн в обоих условиях, что видно на рис. 3.

На рис. 4 показаны ПСС в монтаже плотности источников тока. Во временном диапазоне 76–508 мс выделен кластер, состоящий из двух колебаний (рис. 4, А, Б):

1. Отрицательное колебание в проекции височно-затылочных отделов обоих полушарий (P_4 ; O_1 ; Oz ; O_2) с пиком латентного периода около 104 мс и максимумом в Oz . По величине это колебание развивается больше при предъявлении совпадающего изображения, $p < 0.001$.

2. Положительная волна ПСС, регистрируемая в теменно-височных и лобных отделах (Fp_1 ; Fp_2 ; C_3 ; TP_7 ; CP_3 ; CP_4 ; TP_8 ; P_7 ; P_3 ; P_4 ; P_8), с пиком около 236 мс и максимумом в P_7 ; P_8 . По величине больше при несовпадении стимулов, $p < 0.001$.

Второй кластер (рис. 4, А, В) представлен отрицательным колебанием во временном отрезке 92–460 мс. Это отрицательное колебание с латентным периодом около 244 мс, которое регистрируется в височно-центральных отделах (F_7 ; Fz ; F_4 ; F_8 ; FT_7 ; FCz ; FC_4 ; FT_8 ; T_7 ; Cz ; T_8 ; CPz ; Oz ; O_2) с максимумом в Fz ; FCz . По величине больше при несовпадении стимулов, $p < 0.001$.

Третий кластер (428–888 мс) соответствует различию нисходящей фазы поздней положительной волны в условии совпадения стимулов и поздней положительной волны в условии несовпадения стимулов (рис. 4, А, Д). Как и в референ-том монтаже колебание с максимумом в Pz возникает раньше по времени при совпадении стимулов, около 350 мс (как было сказано выше, не вся волна входит в кластер, а ее нисходящая фаза), чем положительное колебание с максимумом около 500 мс при предъявлении несовпадающих изображений, $p < 0.001$ (рис. 4, А).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты анализа поведенческих показателей выявили относительно большое количество ошибок как на совпадение, так и на несовпадение стимулов, что указывает на то, что данный тест оказался достаточно сложным для выполнения. Большое число ошибок объясняется тем, что многие участники исследований нажимали кнопку еще до предъявления разрешающего стимула.

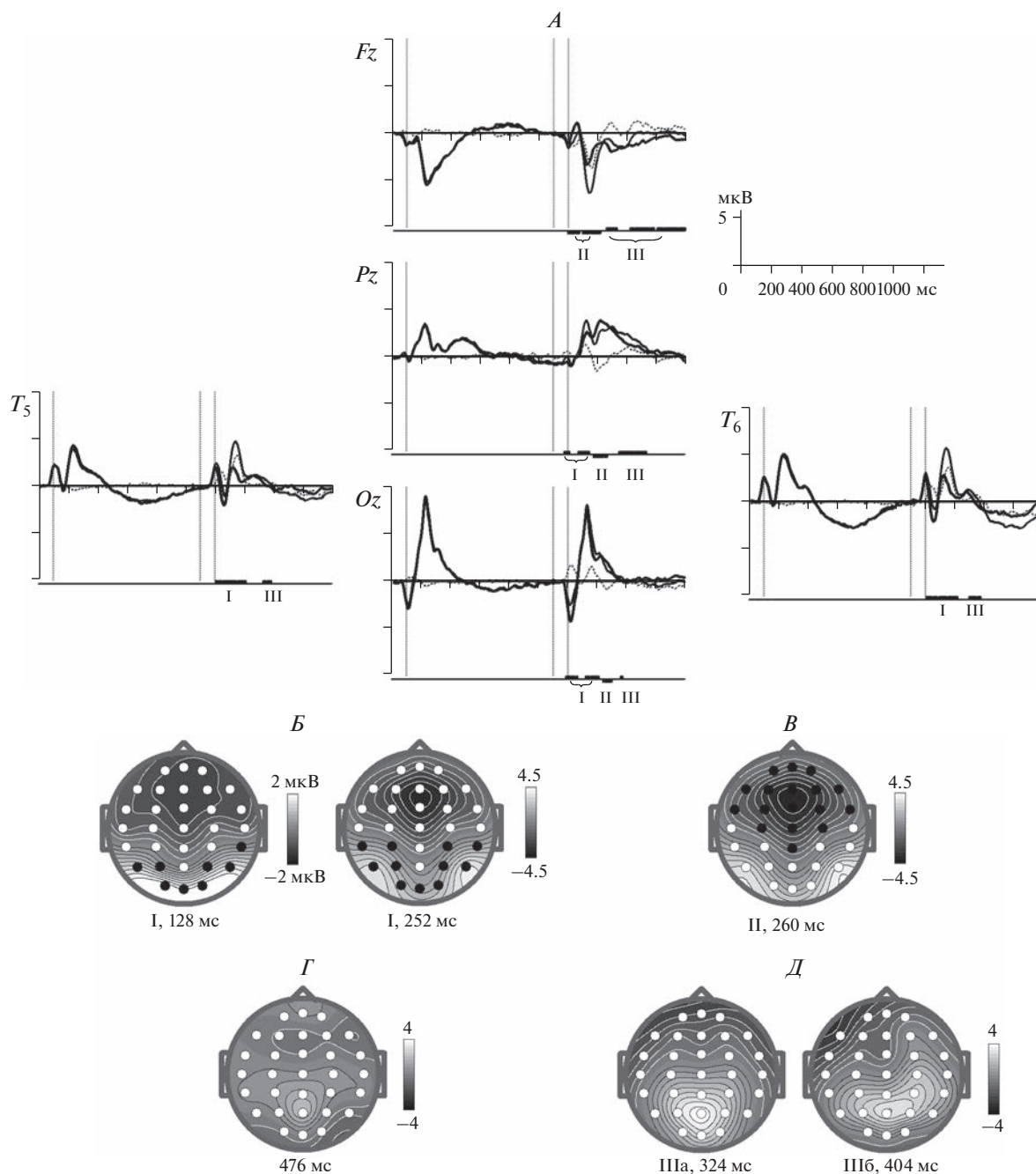


Рис. 3. Усредненные по группе связанные с событиями потенциалы (ПСС), рассчитанные относительно стандартизованного референта (*REST*).
Остальные обозначения см. рис. 2.

При обсуждении результатов анализа ПСС, прежде всего, необходимо подчеркнуть, что использование экспериментальной парадигмы с отсроченным ответом позволяет лучше определить пространственно-временные характеристики ранних компонент ПСС затылочной и височной локализации. Это связано с тем, что в данной экспериментальной парадигме волна P_3 значительно меньше по величине (порядка 5–6 мкВ),

тогда как при использовании тестов без “разрешающего” стимула, когда ответная реакция выполняется сразу после второго стимула, величина этой волны достигает 20–30 мкВ (рис. 1 [8] и рис. 3 [30]), причем в последнем случае эта волна более широко пространственно распределена.

При сравнении результатов в трех монтажах, можно сделать следующие обобщения. Во-первых, во всех трех использованных монтажах (ЭЭГ

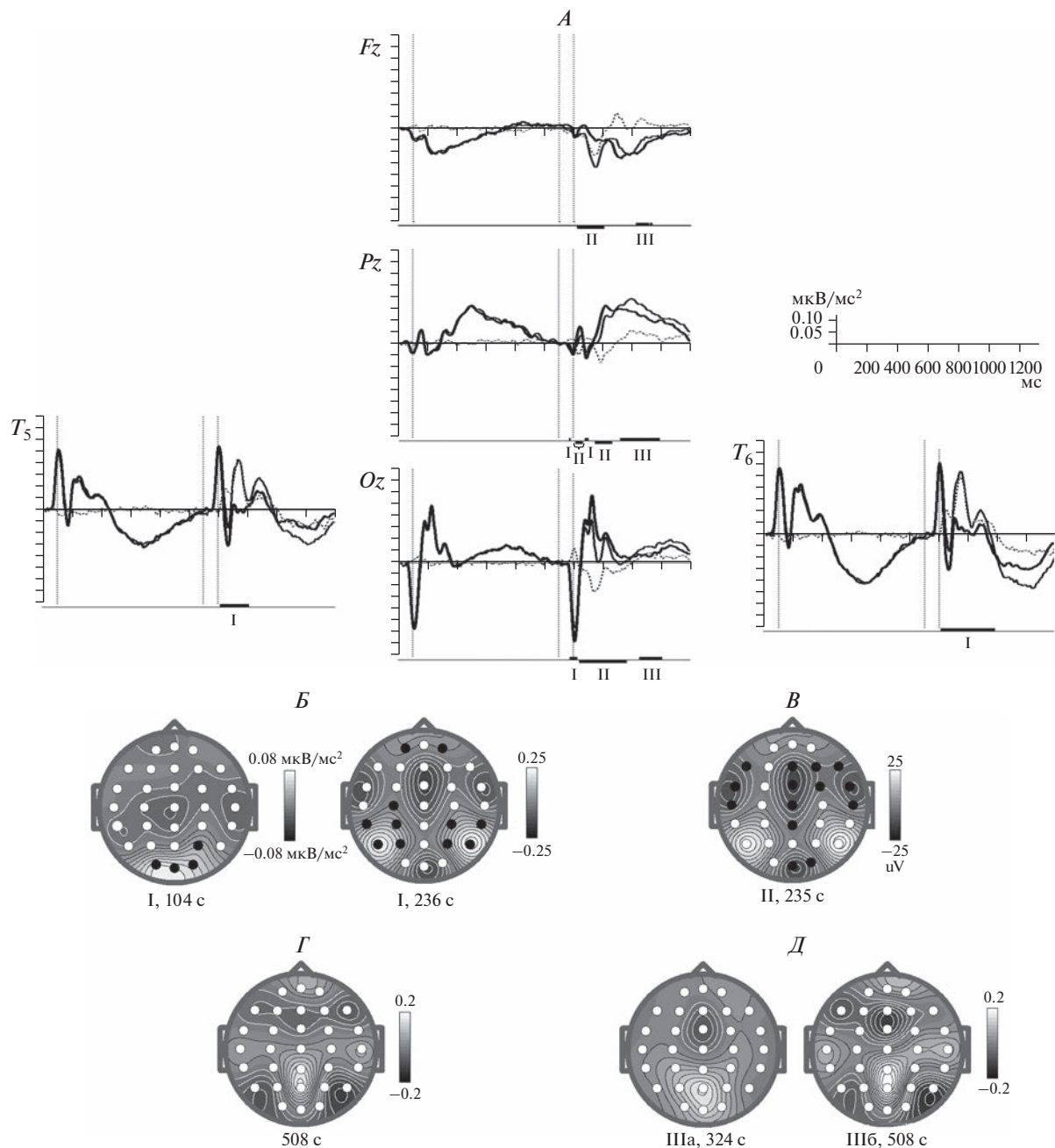


Рис. 4. Усредненные по группе связанные с событиями потенциалы (ПСС) для ЭЭГ, преобразованной к плотности источников тока.

По оси ординат — величина плотности источников тока, мкВ/см². Остальные обозначения см. рис. 2.

относительно среднего потенциала референтных ушных электродов, ЭЭГ к стандартизованному референту и ЭЭГ, преобразованной к так называемой плотности источников тока) выделяются схожие кластеры с колебаниями потенциала одинаковой полярности и максимумом в проекции одних и тех же зон мозга. Во-вторых, различия между монтажами выражаются в длине кластеров. Самый короткий временной интервал выде-

ляется при кластерном анализе в референтном монтаже, длиннее в плотности источников тока, самый длинный — при расчете ЭЭГ, стандартизованному референту. Как показало наше исследование, при использовании *REST*-монтажа в кластер был включен максимум позднего положительного колебания, чего не происходило при двух других монтажах. Традиционно величина ПСС рассматривается для пика колебания. При

использовании монтажа *REST* появляется возможность описать волны, входящие в третий кластер по общепринятой принятой схеме. Наблюдение, касающееся *REST*-монтажа, согласуется с данными литературы [23]. В-третьих, при использовании монтажа в плотности токов количество электродов, участвующих в кластере, меньше, это является преимуществом данного монтажа при определении области мозга, в которой, вероятно, находятся источники сигналов. И в сигналах этих источников отражается наблюдаемый эффект.

Вопрос о референте при записи ЭЭГ является одной из старейших технических проблем в практике ЭЭГ. Использование нескольких вариантов референта в нашей исследовательской работе дало взаимодополняющие результаты. Из сказанного выше можно сделать заключение, что целесообразно использовать все три монтажа для описания процессов. Для решения конкретных задач (временные рамки, локализация или развитие волнового процесса) можно использовать референтный, плотность источников тока, *REST*-монтаж отдельно.

Можно предположить, что величина зрительных ПСС с левого полушария (ЛП) до 100 мс отражает физические характеристики зрительного стимула, таким образом, различия в величине этого сигнала объясняются различиями в параметрах стимулов. Эти волны не рассматривались в настоящей работе. Для волн, регистрируемых после 100 мс, исследователи находят связь с процессами когнитивной обработки сигнала, например, автоматическим запоминанием и сличением характеристик стимула. В нашем исследовании было зарегистрировано отрицательное колебание около 140 мс, которое по величине было больше в случае предъявления второго стимула, полностью идентичного первому. По затылочной локализации и времени возникновения это колебание можно соотнести с описанным в литературе компонентом *N1*.

Особенностью этого колебания является то, что его величина связана не только с физическими характеристиками стимула, но и поздней сенсорной обработкой, модулируемой пространственным вниманием [31]. Стоит отметить, что при обучении, повторении сигнала величина *N1* уменьшается [31]. В то время, как при увеличении внимания к стимулу происходит увеличение амплитуды *N1* [32], а также комплекса *P1*, который отражает последовательное усиление внимания в ранних зрительных областях коры [33].

Можно предположить, что при предъявлении стимулов существуют два процесса, происходящие в зрительной коре, более того, происходящие в пределах одной и той же области — подавление повторения (*repetition suppression*) и усиление повторения, *RE* (*repetition enhancement*) [34].

Происходят такие процессы в ситуации, где восприятие требует вычисления как предсказаний (усиливаются повторением), так и ошибок предсказаний (подавляются повторением) [35] в контексте задач, которые подразумевают или не подразумевают явный мнемонический компонент [34]. Применительно к нашим данным это, возможно, означает, что прогнозируется совпадение второго стимула с первым (прайминг).

В качестве нейронных механизмов, объясняющих это явление, может быть предложено следующее. По электрофизиологическим данным, полученным на приматах, подавление нейронной активности при повторении сигнала затрагивает большинство зарегистрированных нейронов, однако часть выборочной совокупности, т.н. “селективных нейронов” более остро реагирует на простое повторение [34]. Таким образом, это не единая группа нейронов, а две, реагирующие на стимул по-разному.

Положительное колебание с пиком около 230–240 мс в задневисочных отделах. В литературных источниках и в ранее представленных экспериментах авторов настоящего исследования [5–9, 30], в теменных отведениях регистрируется колебание *P2* (с пиковой латентностью 200–300 мс) в задачах на выявление рассогласования стимулов, в тестах с парадигмой вовлечения/подавления действий, автоматическое распознавание стимулов, обнаружение изменений и эффекты, связанные с вниманием. Полученное в нашем тесте колебание может быть квалифицировано как компонент *P2* зрительных вызванных потенциалов по признакам локализации и условиям регистрации: регистрируется в височно-затылочные отделы мозга, в ответ на второй зрительный стимул в паре, имеющий различия с первым, амплитуда ответа выше при условии несовпадения физических характеристик стимула. Можно предположить, что эта волна ПСС отражает процессы *обнаружения несоответствия* при сравнении входящей информации с образом, хранящимся в рабочей памяти [9, 10, 30].

Отрицательное колебание с ЛП 260 мс и максимумом в Fz. Это колебание имеет большую амплитуду при несовпадении стимулов и классифицируется нами как колебание *N270* (*N2*). Волна *N270* регистрируется в двухстимульной парадигме в ответ на второй стимул в условиях “конфликта” — несовпадения первого и второго стимулов. Причем в случае полного несовпадения наблюдается максимальная амплитуда этого компонента по сравнению с частичным несовпадением или совпадением стимулов [36]. Когнитивной основой этого колебания *N270*, является общая, но уже *осознаваемая обработка конфликта* представления рабочей памяти [10]. Исследования, посвященные *N270*, показали, что этот компонент, воз-

можно, генерируется дорсальной передней поясной корой [37]. Также имеются свидетельства, что в этот временной промежуток, около 270 мс, возможны процессы сравнения сигналов из разных сенсорных систем [38], и происходят они в лобных отделах коры больших полушарий.

Положительное колебание в Pz, при совпадении стимулов, около 350 мс, при несовпадающих изображениях около 384 мс. В настоящее исследование был намеренно введен третий стимул “точка”, т.к. хорошо описано положительное колебание, возникающее через 300–400 мс после возникновения стимула, в двухстимульной парадигме *Go-NoGo* в ситуации сравнения стимулов [4, 8, 12]. Его связывают с формированием двигательной установки, вовлечением/подавлением действия и работой исполняющих функций мозга (*executive functions*). Чтобы отделить компоненты, связанные с обработкой сигнала, от компонент, связанных с формированием движений, реагировать предлагалось после разрешающего стимула. По нашему мнению, компоненты, непосредственно связанные с командами на совершение действия, развиваются после его предъявления. Исходя из этого предположения, а также из соображений, что время реакции при сравнении картинок в подобной ситуации составляет у взрослого человека около 500 мс [9], можно связать положительное колебание в теменных отделах с принятием решения [39] и переключением с обработки сигнала на выполнение других задач [40, 41]. В нашем случае это могут быть, в первую очередь, задачи ожидания запускающего стимула, и параллельно, обработку смысловых характеристик стимула. Важно отметить, что после предъявления первого стимула в паре также наблюдается положительное отклонение потенциала, но не являющееся статистически достоверным, это не противоречит сделанному предположению о переключении с одной стадии обработки информации на другую.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа ПСС в трехстимульном тесте с разрешающим ответную реакцию третьим стимулом показали следующие процессы, которые протекают при сличении двух зрительных стимулов.

Во-первых, это процессы, связанные с рабочей памятью, отражающиеся в двух компонентах ПСС в диапазоне времени 68–320 мс. Отрицательная волна в проекции затылочных отделов полушарий (наиболее выраженная в интервале 100–150 мс); при совпадении второго сигнала с первым вызывает большую по величине реакцию, эта волна, по мнению авторов настоящей статьи, связана с процессами восприятия и предварительного прогнозирования. Положительное колебание, наблюдаемое в интервале около 190–270 мс

в задневисочных отделах, предположительно связано с механизмами сличения сигналов в рабочей памяти.

Во-вторых, в лобных отделах коры регистрируется отрицательный компонент, отражающий, по мнению авторов настоящей статьи, осознаваемую обработку конфликта между сигналом и представлением в рабочей памяти, его временной диапазон 240–300 мс.

В-третьих, в промежутке времени 270–450 мс в проекции теменных отделов формируется положительная волна, связанная с формированием ответа при совпадении или несовпадении стимулов и принятием осознанного решения дальнейшей ответной реакции.

Данные могут быть полезны исследователям, занимающимся проблемами восприятия, прайминга и рабочей памяти.

Этические нормы. Исследование проведено в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комитетом по этике Института мозга человека им. Н.П. Бехтерева РАН (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки по теме № 122041300021-4.

Благодарности. Авторы выражают благодарность студентам Санкт-Петербургского государственного педиатрического медицинского университета за участие в исследовании.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. И.С. Никишена — разработка трехстимульного теста, регистрация ЭЭГ в условиях трехстимульного теста, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи. В.А. Пономарев — разработка трехстимульного теста, статистическая обработка данных, подготовка текста статьи. Ю.Д. Кропотов — обсуждение результатов, подготовка текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bridger E.K., Kursawe A.L., Bader R. et al. Age effects on associative memory for novel picture pairings // Brain Res. 2017. V. 1664. P. 102.
2. Spironelli C., Romeo Z., Maffei A., Angrilli A. Comparison of automatic visual attention in schizophrenia, bipolar disorder, and major depression: Evidence from

- P1 event-related component // *Psychiatry Clin. Neurosci.* 2019. V. 73. № 6. P. 331.
3. *Forschack N., Gundlach C., Hillyard S., Müller M.M.* Electrophysiological evidence for target facilitation without distractor suppression in two-stimulus search displays // *Cereb. Cortex.* 2022. V. 32. № 17. P. 3816.
 4. *Kappenman E.S., Farrens J.L., Zhang W. et al.* ERP CORE: An open resource for human event-related potential research // *Neuroimage.* 2021. V. 225. P. 117465.
 5. *Stahl J., Wiese H., Schweinberger S.R.* Learning task affects ERP-correlates of the own-race bias, but not recognition memory performance // *Neuropsychologia.* 2010. V. 48. № 7. V. 10. P. 2027.
 6. *He J., Zheng Y., Fan L. et al.* Automatic Processing Advantage of Cartoon Face in Internet Gaming Disorder: Evidence From P100, N170, P200, and MMN // *Front. Psychiatry.* 2019. V. 10. P. 824.
 7. *Male A.G., O'Shea R.P., Schröger E. et al.* The quest for the genuine visual mismatch negativity (vMMN): Event-related potential indications of deviance detection for low-level visual features // *Psychophysiology.* 2020. V. 57. № 6. P. e13576.
 8. *Kropotov J., Ponomarev V., Tereshchenko E.P. et al.* Effect of Aging on ERP Components of Cognitive Control // *Front. Aging Neurosci.* 2016. V. 8. P. 69.
 9. *Кропотов Ю.Д., Пономарев В.А., Пронина М.В., Полякова Н.В.* Эффекты повторения и рассогласования стимулов в сенсорных зрительных компонентах потенциалов, связанных с событиями // *Физиология человека.* 2019. Т. 45. № 4. С. 5.
Kropotov Y.D., Ponomarev V.A., Pronina M.V., Polyakova N.V. Effects of repetition and stimulus mismatch in sensory visual components of event-related potentials // *Human Physiology.* 2019. V. 45. № 4. P. 349.
 10. *Wang P., Tan C.H., Li Y. et al.* Event-related potential N270 as an index of social information conflict in explicit processing // *Int. J. Psychophysiol.* 2018. V. 123. P. 199.
 11. *Rivera B., Soyulu F.* Incongruity in fraction verification elicits N270 and P300 ERP effects // *Neuropsychologia.* 2021. V. 161. P. 108015.
 12. *Kropotov J.D., Ponomarev V.A.* Differentiation of neuronal operations in latent components of event-related potentials in delayed match-to-sample tasks // *Psychophysiology.* 2015. V. 52. № 6. P. 826.
 13. *Gemba H., Sasaki K.* Potential related to no-go reaction of go/no-go hand movement task with color discrimination in human // *Neurosci. Lett.* 1989. V. 101. № 3. P. 263.
 14. *Jodo E., Kayama Y.* Relation of a negative ERP component to response inhibition in a Go/No-go task // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1992. V. 82. № 6. P. 47715.
 15. *Finkenzeller T., Doppelmayr M., Würth S., Amesberger G.* Impact of maximal physical exertion on interference control and electrocortical activity in well-trained persons // *Eur. J. Appl. Physiol.* 2018. V. 118. № 12. P. 2509.
 16. *Feldman J.L., Freitas A.L.* An Analysis of N2 Event-Related Potential Correlates of Sequential and Response-Facilitation Effects in Cognitive Control // *J. Psychophysiol.* 2018. V. 33. № 2. P. 85.
 17. *Zabelina D.L., Ganis G.* Creativity and cognitive control: Behavioral and ERP evidence that divergent thinking, but not real-life creative achievement, relates to better cognitive control // *Neuropsychologia.* 2018. V. 118(Pt. A). P. 20.
 18. *Xiao Y., Wu J., Tang W. et al.* Cognition Impairment Prior to Errors of Working Memory Based on Event-Related Potential // *Front. Behav. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 13.
 19. *Overbye K., Walhovd K.B., Fjell A.M. et al.* Electrophysiological and behavioral indices of cognitive conflict processing across adolescence // *Dev. Cogn. Neurosci.* 2021. V. 48. P. 100929.
 20. *Polich J.* Updating P300: an integrative theory of P3a and P3b // *Clin. Neurophysiol.* 2007. V. 118. № 10. P. 2128.
 21. *Hillman C.H., Weiss E.P., Hagberg J.M., Hatfield B.D.* The relationship of age and cardiovascular fitness to cognitive and motor processes // *Psychophysiology.* 2002. V. 39. № 3. P. 303.
 22. *Vigário R.N.* Extraction of ocular artifacts from EEG using independent component analysis // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1997. V. 103. № 3. P. 395.
 23. *Dong L., Li F., Liu Q. et al.* MATLAB Toolboxes for Reference Electrode Standardization Technique (REST) of Scalp EEG // *Front. Neurosci.* 2017. V. 11. P. 601.
 24. *Hu S., Lai Y., Valdes-Sosa P.A. et al.* How do reference montage and electrodes setup affect the measured scalp EEG potentials? // *J. Neural Eng.* 2018. V. 15. № 2. P. 026013.
 25. *Perrin F., Pernier J., Bertrand O., Echallier J.F.* Spherical splines for scalp potential and current density mapping // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1989. V. 72. № 2. P. 184.
 26. *Kayser J., Tenke C.E.* Principal components analysis of Laplacian waveforms as a generic method for identifying ERP generator patterns: I. Evaluation with auditory oddball tasks // *Clin. Neurophysiol.* 2006. V. 117. № 2. P. 348.
 27. *Kayser J., Tenke C.E.* Principal components analysis of Laplacian waveforms as a generic method for identifying ERP generator patterns: II. Adequacy of low-density estimates // *Clin. Neurophysiol.* 2006. V. 117. № 2. P. 369.
 28. *Maris E., Oostenveld R.* Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data // *J. Neurosci. Methods.* 2007. V. 164. № 1. P. 177.
 29. *Pernet C.R., Latinus M., Nichols T.E., Rousselet G.A.* Cluster-based computational methods for mass univariate analyses of event-related brain potentials/fields: A simulation study // *J. Neurosci. Methods.* 2015. V. 250. P. 85.
 30. *Никишена И.С., Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д.* Потенциалы связанные с событиями в тесте на сравнение пар слов в зрительной и слуховой модальности // *Физиология человека.* 2021. Т. 47. № 4. С. 115.
Nikishena I.S., Ponomarev V.A., Kropotov Y.D. Event-related potentials in audio-visual cross-modal test in comparison of word pairs // *Human Physiology.* 2021. V. 47. № 4. P. 459.

31. *Ahmadi M., McDevitt E.A., Silver M.A., Mednick S.C.* Perceptual learning induces changes in early and late visual evoked potentials // *Vision Res.* 2018. V. 152. P. 101.
32. *Balla V.R., Szalóki S., Kilencz T. et al.* A novel experimental paradigm with improved ecological validity reveals robust action-associated enhancement of the N1 visual event-related potential in healthy adults // *Behav. Brain Res.* 2020. V. 379. P. 112353.
33. *Woldorff M.G., Liotti M., Seabolt M. et al.* The temporal dynamics of the effects in occipital cortex of visual-spatial selective attention // *Brain Res. Cogn. Brain Res.* 2002. V. 15. № 1. P. 1.
34. *Tartaglia E.M., Mongillo G., Brunel N.* On the relationship between persistent delay activity, repetition enhancement and priming // *Front. Psychol.* 2015. V. 5. P. 1590.
35. *de Gardelle V., Waszczuk M., Egner T., Summerfield C.* Concurrent repetition enhancement and suppression responses in extrastriate visual cortex // *Cereb. Cortex.* 2013. V. 23. № 9. P. 2235.
36. *Zhang X., Wang Y., Li Sh., Wang L.* Event-related potential N270, a negative component to identification of conflicting information following memory retrieval // *Clin. Neurophysiol.* 2003. V. 114. № 12. P. 2461.
37. *Folstein J.R., Van Petten C.* Influence of cognitive control and mismatch on the n2 component of the ERP: a review? // *Psychophysiology.* 2008. V. 45. № 1. P. 152.
38. *Scannella S., Pariente J., De Boissezon X. et al.* N270 sensitivity to conflict strength and working memory: A combined ERP and sLORETA study // *Behav. Brain Res.* 2016. V. 297. P. 231.
39. *Verleger R., Grauhan N., Śmigajewicz K.* Is P3 a strategic or a tactical component? Relationships of P3 sub-components to response times in oddball tasks with go, no-go and choice responses // *Neuroimage.* 2016. V. 143. P. 223.
40. *Astle D.E., Jackson G.M., Swainson R.* Dissociating neural indices of dynamic cognitive control in advance task-set preparation: an ERP study of task switching // *Brain Res.* 2006. V. 1125. № 1. P. 94.
41. *Elke S., Wiebe S.A.* Proactive control in early and middle childhood: An ERP study // *Dev. Cogn. Neurosci.* 2017. V. 26. P. 28.

Event-Related Potentials of the Human Brain During the Comparison of Visual Stimuli

I. S. Nikishena^{a, *}, V. A. Ponomarev^a, J. D. Kropotov^a

^a*Bechtereva Institute of the Human Brain, RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*}*E-mail: nikishena@mail.ru*

The aim of the investigation was to study the features of the brain activity when comparing visual stimuli under conditions of delayed motor response. Event-related potentials (ERP) were studied in 84 healthy subjects in a three-stimulus test, the first two stimuli were a comparison pair, and the third stimulus triggered a motor response. After presentation of the second stimulus ERP were recorded: a complex of two waves with occipital (O_z , most pronounced in the interval 100–150 ms) and posterior temporal localization (P_7 , P_8 , 190–270 ms); negative oscillation in the frontal regions (F_z , 240–300 ms) and positive oscillation in the parietal regions (P_z , 270–450 ms). Brain responses differ in amplitude in case of match and discrepancy of visual stimuli. The article discusses the physiological meaning of these waves and their differences under two conditions.

Keywords: working memory, perception, priming, event-related potentials (ERP).

РОЛЬ ЗОНЫ БРОКА И ЕЕ ПРАВОПОЛУШАРНОГО ГОМОЛОГА В УСВОЕНИИ АБСТРАКТНОЙ И КОНКРЕТНОЙ СЕМАНТИКИ: ДАННЫЕ ТРАНСКРАНИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТИМУЛЯЦИИ

© 2023 г. Д. С. Гнедых¹, *, Е. Д. Благовещенский², С. Н. Костромина¹,
Н. А. Мкртычян¹, Ю. Ю. Штыров³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Орхусский университет, Орхус, Дания

*E-mail: d.gnedyh@spbu.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 31.01.2023 г.

В данной статье представлено сравнение результатов научения новым конкретным и абстрактным словам после транскраниальной электрической стимуляции (ТЭС, также известной как микрополяризация) зоны Брока и ее правополушарного гомолога. Усвоение новых понятий происходило через чтение предложений, последовательно раскрывающих их значение. Перед обучением проводили 15-минутную анодную или катодную стимуляцию одной из целевых зон. Проверку результатов обучения проводили сразу после обучения и спустя 24 ч с помощью задания на лексическое решение. Была выявлена вовлеченность правополушарного гомолога зоны Брока в усвоение и обработку новых конкретных и абстрактных понятий, выразившаяся в увеличении количества правильных ответов после ее стимуляции по сравнению с зоной Брока левого полушария. Было установлено, что ТЭС гомолога зоны Брока оказала положительное влияние на консолидацию мнемических репрезентаций новых слов.

Ключевые слова: транскраниальная электрическая стимуляция (микрополяризация), зона Брока, правополушарный гомолог зоны Брока, конкретные слова, абстрактные слова, усвоение понятий, научение, мозг, язык (речь), правое полушарие.

DOI: 10.31857/S0131164622600926, EDN: GCENLX

Процессы усвоения речевых навыков являются предметом исследования различных областей знаний — когнитивных наук, психолингвистики, нейрофизиологии, наук об образовании. Можно выделить такие проблемы, как сохранение семантических следов в рабочей памяти, продолжительность интеграции слов в ментальный лексикон, роль различных зон мозга в речевых функциях, специфика условий обучения новой терминологии и др. Особенно актуальным является вопрос о механизмах усвоения мозгом новых слов как конкретных, так и абстрактных.

Принято считать, что конкретные слова имеют референты в физическом (материальном) мире, т.е. обозначают существующие объекты, действия или явления (например, “река”, “полет”, “ураган”), в то время как абстрактные слова относятся к менее явным или даже не имеющим физического воплощения явлениям, таким как психические состояния (например, “замешательство”),

ситуации (“бунт”), эмоции (“счастье”), отношения (“дружба”) и т.д. [1]. Согласно данным поведенческих исследований, конкретные слова, по сравнению с абстрактными, лучше распознаются [2] и быстрее обрабатываются [3]. Такие различия, в свою очередь, могут указывать на то, что нейрофизиологические механизмы кодирования конкретной и абстрактной семантики могут отличаться. Так, существует предположение, что конкретные слова усваиваются за счет не только чисто речевого, но также сенсорного и моторного опыта [4], а кодирование абстрактных слов и доступ к ним преимущественно поддерживаются основными речевыми областями в левом полушарии головного мозга (ГМ) — зоной Брока и зоной Вернике [5], без явного вовлечения других (например, модальностеспецифических сенсорных и моторных) зон. Однако последние исследования указывают на вовлечение большего количества зон ГМ в обработку абстрактных понятий [6].

Имеющиеся данные о зонах ГМ, участвующих в обработке абстрактных и конкретных слов, в целом несут неоднозначный характер [7].

Функционально зону Брока (часть левой нижней лобной извилины; *inferior frontal gyrus, IFG*) связывают с порождением речи в целом [8, 9], генерацией глаголов [10], синтаксической [11, 12], фонологической [13] и семантической обработкой речи [14, 15]. Так, во время одновременного выполнения артикуляционной задачи (многократное повторение слога) и задачи на семантическую категоризацию слов было зафиксировано более длительное время отклика для абстрактных слов по сравнению с конкретными [3], что указывает на конкуренцию за вовлечение области Брока в процессы контроля артикуляции и доступа к абстрактным словам. Недавние исследования также подтверждают, что в процессе абстрактного мышления, как и при обработке непосредственно абстрактных слов, активируются области, связанные с внутренней речью [16, 17].

Ряд исследований также указывает на участие *правополушарного гомолога зоны Брока* в обработке речи, в частности, в понимании знакомых метафор [18], а также в синтаксической и семантической обработке [19, 20]. С другой стороны, была обнаружена более выраженная активация в правой нижней лобной извилине при обработке конкретных существительных по сравнению с абстрактными, в то время как левая нижняя лобная извилина, наоборот, показывала большую активность при восприятии абстрактных понятий [21]. Также было выявлено, что задняя треть правой *IFG* включается в производство речи в случае повреждения левой *IFG*, которая обычно и обеспечивает этот процесс [22]. При этом в норме продуцирование речи подавляет активность правой *IFG* (там же). Эти факты свидетельствуют о существовании сложной динамической связи между левой и правой нижними лобными извилинами во время речепроизводства [23].

Важно отметить, что результаты исследований с использованием таких методов нейровизуализации, как функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), демонстрируют активацию какой-либо области ГМ после предъявления некоторого стимула, однако такая активация может являться и вторичным побочным эффектом, не связанным напрямую с рассматриваемыми когнитивными процессами. Выявление же причинно-следственной взаимосвязи обеспечивают методы неинвазивной стимуляции мозга, одним из которых является транскраниальная электрическая стимуляция постоянным током (ТЭС, также известная как микрополяризация). В отличие от

магнитной стимуляции, которая может непосредственно вызывать потенциалы действия нейронов, воздействие ТЭС является более мягким и заключается в сдвиге трансмембранного потенциала покоя, приводящем к изменениям паттернов активации определенных областей ГМ при обработке того или иного стимула [24, 25]. Данный метод активно используется в исследованиях, посвященных изучению моторной системы, в которых была выявлена следующая тенденция: анодная ТЭС чаще всего связана с увеличением, а катодная — с торможением возбудимости первичной моторной коры ГМ [26, 27]. Однако при изучении когнитивных функций, в частности, речи, проявление таких противоположных по направлению эффектов полярности ТЭС не так очевидно.

Предыдущие исследования показали, что анодная ТЭС области Брока улучшает усвоение грамматических навыков у здоровых испытуемых [28] и облегчает воспроизведение глаголов у лиц с хронической афазией [29], а катодная ТЭС правой *IFG* обеспечивает более быстрое называние изображений [30]. В клинических исследованиях также было выявлено, что одновременная двусторонняя ТЭС (анодная стимуляция области Брока и катодная — ее правополушарного гомолога) улучшает речевые и языковые навыки (по сравнению с плацебо-стимуляцией) [31, 32], а анодная ТЭС левой и правой *IFG* у пожилых испытуемых во время устного рассказа улучшает производство речи по сравнению с плацебо-стимуляцией [33]. Большинство исследований с использованием ТЭС, посвященных выявлению функций зоны Брока и ее правополушарного гомолога в обработке языка, в основном сосредоточены на изучении производства речи и обработки синтаксиса. Только в некоторых экспериментах исследовалось участие данных областей ГМ в семантической обработке.

Таким образом, целью настоящего исследования стало изучение роли зоны Брока и ее правополушарного гомолога в усвоении новых абстрактных и конкретных слов с помощью ТЭС. Одной из задач исследования также являлась оценка устойчивости эффектов ТЭС во времени, а именно влияние стимуляции на консолидацию следов памяти во время сна. Принято считать, что такая консолидация способствует интеграции новых слов в ментальный лексикон [34]. Согласно одним исследованиям, эффект лексической интеграции проявляется спустя сутки или даже недели после изучения новых слов [35, 36], в то время как другие утверждают, что она может быть сразу после обучения [37, 38].

Основываясь на результатах исследований, рассмотренных выше, нами были выдвинуты следующие гипотезы:

1. Зона Брока и ее правополушарный гомолог больше вовлечены в обработку абстрактных, чем конкретных слов и, следовательно, основные эффекты ТЭС должны проявляться по отношению к абстрактной семантике. Такие эффекты могут иметь генерализованный характер и выражаться как в улучшении, так и в ухудшении усвоения абстрактных слов по сравнению с конкретными словами в зависимости от зоны стимуляции.

2. ТЭС целевых областей может по-разному влиять на консолидацию следов памяти для конкретных и абстрактных слов; однако, отсутствие в предыдущих исследованиях ингибирующего влияния катодной стимуляции на языковые функции [39, 40] не позволило нам сделать однозначное предположение об избирательном характере воздействия двух полярностей на усвоение того или иного типа семантики.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 96 чел. в возрасте от 18 до 35 лет (средний возраст $\pm$ ст. отклонение — 22.4 ± 4.64) без истории психоневрологических расстройств, травм головного мозга и употребления наркотическими веществами в анамнезе; все испытуемые — правши, единственный родной язык — русский. Испытуемые были разделены на четыре группы по 24 чел.: количество мужчин в зависимости от группы варьировалось от 4 до 6, женщин — от 18 до 20, однако согласно статистической проверке (χ^2 Пирсона) группы по полу были однородны ($p = 0.868$, $\chi^2(3) = 0.722$), а также не различались по возрасту ($p = 0.198$, $\chi^2(3) = 4.666$), праворукости ($p = 0.395$, $\chi^2(3) = 2.981$), уровню образования (измеренном в годах; $p = 0.212$, $\chi^2(3) = 4.499$) и по возрасту начала изучения второго языка ($p = 0.392$, $\chi^2(3) = 2.997$) (критерий Н Краскала-Уоллиса).

Стимульный материал. В качестве стимульного материала выступали словоформы, подобранные к ним конкретные и абстрактные значения и набор предложений, в контексте которых передавали значение новых понятий.

Новые словоформы создавали на основе 40 слов (восьмибуквенных существительных, состоящих из трех слогов, например, “барбарис”) родного для испытуемых языка. Сформированные из них случайным образом 4 группы слов (по 10 слов в каждой) статистически не различались по частоте лемм и последних слогов (согласно t -критерию).

Процедура создания новых словоформ заключалась в перестановке последних слогов внутри трех групп из 10 слов (например, *барбарин*, где первые два слога взяты от слова *барбарис*, а последний слог — от слова *мандарин*). Слова из четвертой группы не менялись и выступали в качестве контрольного условия в проверочном задании. Каждая словоформа побывала в разной роли, которую чередовали между испытуемыми — в качестве нового конкретного понятия, абстрактного понятия или контрольного условия (псевдослова, отсутствующего в обучающем блоке).

Для придания семантики (смысла) новым словам были отобраны 10 конкретных (редкие или устаревшие объекты) и 10 абстрактных (понятия, не представленные в родном языке испытуемых) значений (например, “Механический заводной вертел для жарки мяса на открытом огне”, “Состояние удовольствия от прослушивания музыки в одиночестве”).

Для каждого нового значения было создано 5 предложений из 8 слов каждое (всего 100 предложений, т.е. по 5 на каждую из 20 новых словоформ), что обеспечивало контекстное усвоение понятий. Новое слово всегда помещали в конец предложения в единственном числе и именительном или винительном падеже (например, “Слушая музыку, Оля всегда уединялась, чтобы почувствовать барбарин”).

Стимульным материалом в проверочном задании “Лексическое решение” выступали 80 стимулов, из них 20 новых слов (10 абстрактных и 10 конкретных) и 60 стимулов-филлеров (по 30 слов и псевдослов).

Процедура исследования. 15-минутную катодную или анодную стимуляцию (1.5 мА) ТЭС зоны Брока или ее правополушарного гомолога проводили до начала обучения новым словам при помощи стимулятора “*BrainStim*” (EMS, Италия). Активный электрод (анодный или катодный, 5×5 см) располагали на коже головы над целевой зоной (F_5 или F_6 согласно расширенной международной системе ЭЭГ 10–20), референтный электрод (5×10 см) — над ипсилатеральной лопаткой; с целью достижения хорошего контакта электродов с кожей использовали электродный гель “Унимакс” (компания “Гельтек”, Россия).

Сразу после стимуляции проводили обучение новым словам через предъявление на экране компьютера предложений, раскрывающих их значение. Каждое предложение сначала предъявляли пословно, затем — целиком для полноты понимания (рис. 1). После прочтения полного предложения участники исследования должны были на-

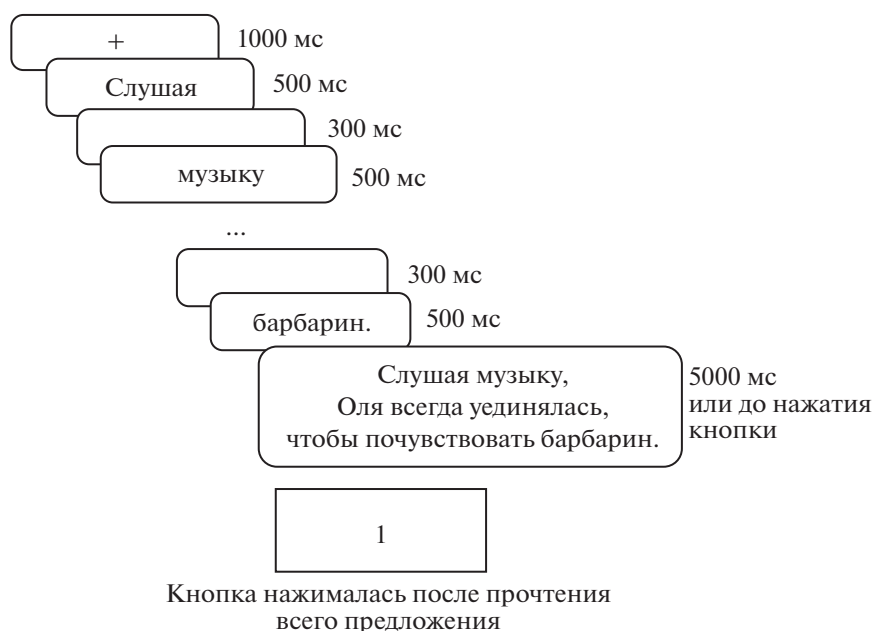


Рис. 1. Контекстное усвоение новых понятий (обучающий этап).

жать клавишу на пульте (*RB-740, Cedrus, США*) указательным пальцем левой руки. Пять предложений, передающих значение одного нового слова, предъявляли подряд, одним блоком. Предложения были отделены друг от друга одинарным фиксационным крестом, а блоки предложений (предъявленные в случайном порядке) – тройным.

Оценку результатов усвоения новых понятий проводили сразу после обучения и через 24 ч при помощи задания “Лексическое решение”. Данное задание является классическим для психолингвистических экспериментов, используется при изучении семантической памяти и лексического доступа, позволяя выявить, насколько быстро и точно стимулы классифицируются индивидом как настоящие слова, и, таким образом, оценить качество соответствующих следов памяти в лексиконе испытуемых. Участникам исследования в центре экрана последовательно в случайном порядке предъявляли новые слова и филлеры (по одному разу каждый). Длительность предъявления стимула составляла 600 мс, фиксационного креста между стимулами – 1400 мс. Стимульный материал был разделен поровну (два набора по 20) для того, чтобы в первый и во второй день предъявления стимулы не повторялись. Задача испытуемого состояла в том, чтобы нажимать кнопку “1”, если ему было представлено слово, имеющее смысл, или “2”, если предъявленное слово не имело смысла; время реакции фиксировали. Такая модификация стандартной задачи

лексического решения, в которой обычно существующие слова противопоставляются неизвестным псевдословам [41, 42], была произведена с целью ее адаптации к задаче научения, поскольку ключевыми стимулами в данном эксперименте выступали недавно выученные слова. Предъявление стимульного материала в обучающей сессии и в проверочном здании происходило с помощью программного обеспечения *NBS Presentation 20.0 (Neurobehavioral Systems, США)*. Продолжительность обучения составила приблизительно 20 мин, выполнения проверочного задания – 3 мин; с учетом заполнения анкеты, информированного согласия, установки электродов и продолжительности стимуляции общая длительность исследования составляла около часа.

Анализ данных. Результаты усвоения оценивали по двум параметрам: 1) количество правильных ответов (максимальное количество баллов – 5 в каждый из дней для каждого типа стимулов); 2) время реакции (ВР) на правильные ответы (превышающее 250 мс), которое фиксировали как задержку нажатия одной из кнопок после предъявление стимула. Оба параметра рассчитывали отдельно для конкретных и абстрактных слов. Сравнительный анализ проводили между типами стимулов (конкретные vs. абстрактные), между днями (первый vs. второй день проверки), а также между группами (анодная ТЭС левого полушария, катодная ТЭС левого полушария, анодная ТЭС правого полушария, катодная ТЭС правого

Таблица 1. Значимые различия между группами стимуляции по параметру количества правильных ответов в задании “Лексическое решение” во второй день проверки (*U*-критерий Манна-Уитни; критерий Хохберга)

Сравнение	Тип слова	<i>Z</i>	<i>p</i> -уровень значимости	Группа	Ср. значение ± ст. ошибка
Катодная ТЭС ЛП vs. Катодная ТЭС ПП	Конкретные слова	−3.502	≤0.0001	Катод ЛП	1.08 ± 0.33
				Катод ПП	2.70 ± 1.45
Катодная ТЭС ЛП vs. Катодная ТЭС ПП	Абстрактные слова	−2.523	≤0.048	Катод ЛП	1.50 ± 0.37
				Катод ПП	2.65 ± 1.43
Анодная ТЭС ЛП vs. Анодная ТЭС ПП	Конкретные слова	−3.014	≤0.021	Анод ЛП	1.25 ± 0.35
				Анод ПП	2.54 ± 0.23
Анодная ТЭС ЛП vs. Анодная ТЭС ПП	Абстрактные слова	−2.843	≤0.032	Анод ЛП	1.21 ± 0.33
				Анод ПП	2.58 ± 0.31

Примечание: ТЭС – транскраниальная электрическая стимуляция; ЛП – левое полушарие; ПП – правое полушарие.

полушария). Для статистического анализа внутригрупповых эффектов использовали критерий Вилкоксона для связанных выборок, межгрупповых – *U*-критерий Манна-Уитни для независимых выборок. Анализ проводили при помощи *SPSS Statistics 26 (IBM, США)*. В качестве метода коррекции для множественных сравнений был выбран критерий Хохберга.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате межгруппового сравнения для параметра “количество правильных ответов” в первый день проверки значимые результаты были обнаружены только при сравнении групп катодной стимуляции и заключались в более высоком количестве правильных ответов для ТЭС правого полушария (ср. значение ± ст. ошибка среднего для каждого типа новых слов: 3.04 ± 1.45) по сравнению с левым (1.58 ± 0.37). Этот эффект, однако, после коррекции на множественные сравнения проявился только на уровне тенденции ($p \leq 0.072$, $Z = -2.625$ как для конкретных, так и для абстрактных слов). Сравнительный анализ времени реакции между типами стимулов (конкретные vs. абстрактные), проведенный для каждой группы в отдельности, выявил, что в катодной группе ВР на конкретные слова было больше (889 ± 41.22), чем на абстрактные (844 ± 26.67) в первый день проверки ($p \leq 0.033$; $Z = -2.134$), однако после коррекции на множественные сравнения данный результат оказался

значимым также только на уровне тенденции ($p \leq 0.099$).

На второй день проверки статистически значимые различия с учетом поправок на множественные сравнения были выявлены для параметра “количество правильных ответов” как между группами катодной стимуляции, так и между группами анодной ТЭС для обоих типов семантики: после стимуляции правополушарного гомолога зоны Брока конкретные и абстрактные понятия усвоились лучше, чем после стимуляции зоны Брока левого полушария (табл. 1). По параметру “время реакции” не было обнаружено никаких значимых различий для второго дня проверки.

Статистически значимых различий при прямом сравнении результатов первого дня проверки с результатами за второй день обнаружено не было.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В проведенном исследовании изучались нейрофизиологические механизмы научения новым конкретным и абстрактным словам на основе вмешательства в процесс обработки информации мозгом при помощи ТЭС, что позволяет судить о критичности участия в данном процессе той или иной области мозга. Авторы настоящей статьи сосредоточились на изучении именно научения новым словам, а не на обработке ранее существовавшей и известной испытуемым абстрактной и конкретной семантики, поскольку использование существующих знакомых слов в психолинг-

вистических исследованиях сопряжено с рядом трудностей. Например, было выявлено, что конкретные слова обычно усваиваются в течение жизни раньше, чем абстрактные [43, 44]; кроме того, слова могут естественным образом отличаться по длине, частоте встречаемости (как целых словоформ, так и составляющих их биграмм и триграмм) и т.д. В связи с этим любые различия в экспериментальных результатах, полученных для конкретных и абстрактных слов, могут быть обусловлены не столько их семантическими особенностями как таковыми, сколько другими сопутствующими переменными. В свою очередь, использование новых, специально сконструированных слов в экспериментальных условиях позволяет полностью контролировать длину, частоту, фонологическую и орфографическую структуру данных слов, а также избежать влияния различного опыта их усвоения и использования. Создание новых словоформ и их значений со строго определенными и уравновешенными параметрами, а также единая процедура научения данным словам позволили нам обеспечить полный контроль над условиями эксперимента.

В результате исследования основные различия во влиянии катодной и анодной ТЭС на научение новым абстрактным и конкретным словам были выявлены при сравнении зоны Брока и ее правополушарного гомолога и выражались в более успешном выполнении проверочного задания после стимуляции последнего. Данные результаты в некоторой степени противоречат теории двойного кодирования, согласно которой конкретные понятия усваиваются на основе сенсомоторного опыта и активируют основанные на восприятии представления, недоступные абстрактным понятиям [45], в то время как обработка абстрактных слов поддерживается только основными речевыми системами головного мозга, находящимися, как традиционно считается, в левом полушарии [5]. Подтверждение данной теории было найдено в некоторых нейровизуализационных исследованиях [21], однако наши данные показывают также возможное вовлечение правого полушария в обработку абстрактных слов, что согласуется, например, с результатами метаанализа, проведенного *R.H. Desai et al.* [6]: обработка и хранение разных типов абстрактных понятий (моральных суждений, чисел, слов, обозначающих эмоции, и т.д.) обеспечивается разными областями обоих полушарий ГМ. С другой стороны, наблюдаемые эффекты стимуляции могли возникнуть не в результате прямого влияния на гипотетические правополушарные семантические механизмы, а за счет того, что стимули-

рование зон правого полушария через межполушарную взаимосвязь может оказывать воздействие (как правило, подавляющее) на работу их гомологов в левом полушарии, влияя в данном случае на процессы возбуждения и торможения в зоне Брока как таковой. Принцип реципрокного межполушарного взаимодействия областей коры ГМ хорошо известен для сенсорных и моторных систем и, как правило, выражается в подавлении контралатеральной активности [46]. Возможно, и в данном случае мы сталкиваемся с антагонистическими взаимоотношениями между центром Брока и его правополушарным гомологом. Для проверки данного предположения необходимы дополнительные исследования с одновременным использованием методов нейровизуализации и стимуляции для отслеживания индуцированной во время ТЭС активации мозга.

Важно отметить, что значимые различия между группами стимуляции наблюдались во второй день проверки, что может говорить в пользу влияния ТЭС на процессы консолидации как конкретных, так и абстрактных слов, причем для обеих полярностей это влияние было положительным. Таким образом, ингибирующий эффект катодной стимуляции, чаще выявляемый при изучении моторной системы [26, 27], в нашем исследовании не подтвердился. Возможно, в данном конкретном случае больше важен сам факт вмешательства в работу той или иной зоны, чем полярность стимуляции [47].

Одним из возможных направлений дальнейших исследований может быть одновременная ТЭС зоны Брока и ее правополушарного гомолога с целью выявления взаимосвязи этих областей в научении новым словам. Такой протокол стимуляции успешно используется в клинических исследованиях для восстановления речевых функций у пациентов с хронической афазией [31, 32], однако доказательств наличия эффектов двусторонней стимуляции у здоровых испытуемых пока не достаточно.

ВЫВОДЫ

1. Основные эффекты стимуляции правополушарного гомолога зоны Брока (относительно левополушарной зоны Брока) проявляются только на второй день, спустя сутки после ТЭС. Это, возможно, указывает на ее роль в консолидации следов памяти при усвоении конкретных и абстрактных понятий.

2. Как катодная, так и анодная ТЭС гомолога зоны Брока способствует усвоению абстрактной и конкретной семантики.

3. ТЭС гомолога зоны Брока положительно влияет на консолидацию следов памяти новых слов.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Санкт-Петербургского государственного университета (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование выполнено при финансовой поддержке Санкт-Петербургского государственного университета (проект № 94615876).

Благодарности. Авторы выражают благодарность Маргарите Филипповой и Ольге Щербаковой за помощь в создании набора стимулов, Екатерине Периковой за помощь в наборе участников, а также Диане Цветовой и Анастасии Филатовой за помощь в сборе данных.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Д.С. Гнедых — сбор данных, визуализация, написание текста статьи; Н.А. Мкртычян — сбор данных, математико-статистическая обработка данных; Е.Д. Благовещенский — методология, редактирование текста статьи; С.Н. Костромина — дизайн исследования, методология, редактирование текста статьи; Ю.Ю. Штыров — дизайн исследования, методология, научное руководство, редактирование текста статьи, проектное финансирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Borghi A.M., Binkofski F.* Words as social tools: an embodied view on abstract concepts. N.Y.: Springer New York, 2014. 127 p.
2. *Fliessbach K., Weis S., Klaver P. et al.* The effect of word concreteness on recognition memory // *NeuroImage*. 2006. V. 32. № 3. P. 1413.
3. *Borghi A.M.* A future of words: language and the challenge of abstract concepts // *J. Cogn.* 2020. V. 3. № 1. P. 42.
4. *Pulvermüller F.* How neurons make meaning: brain mechanisms for embodied and abstract-symbolic semantics // *Trends Cogn. Sci.* 2013. V. 17. № 9. P. 458.
5. *Binder J.R., Westbury C.F., McKiernan K.A. et al.* Distinct brain systems for processing concrete and abstract concepts // *J. Cogn. Neurosci.* 2005. V. 17. № 6. P. 905.
6. *Desai R.H., Reilly M., van Dam W.* The multifaceted abstract brain // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 2018. V. 373. № 1752. P. 20170122.
7. *Mkrtychian N., Blagovechchenski E., Kurmakaeva D. et al.* Concrete vs. abstract semantics: from mental representations to functional brain mapping // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 267.
8. *Broca P.P.* Remarques sur le siège de la faculté du langage articulé, suivies d'une observation d'aphémie (perte de la parole) // *Bulletin et mémoires de la Société Anatomique de Paris*. 1861. № 6. P. 330.
9. *Sahin N.T., Pinker S., Cash S.S. et al.* Sequential processing of lexical, grammatical, and phonological information within Broca's Area // *Science*. 2009. V. 326. № 5951. P. 445.
10. *Tomasino B., Tronchin G., Marin D. et al.* Noun-verb naming dissociation in neurosurgical patients // *Aphasiology*. 2018. V. 33. № 12. P. 1418.
11. *Fiebach C.J., Schlesewsky M., Lohmann G. et al.* Revisiting the role of Broca's area in sentence processing: syntactic integration versus syntactic working memory // *Hum. Brain Mapp.* 2005. V. 24. № 2. P. 79.
12. *Friederici A.D.* The neural basis for human syntax: Broca's area and beyond // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2018. V. 21. P. 88.
13. *Heim S., Eickhoff S.B., Amunts K.* Specialisation in Broca's region for semantic, phonological, and syntactic fluency? // *NeuroImage*, 2008. V. 40. № 3. P. 1362.
14. *Binder J.R., Desai R.H., Graves W.W., Conant L.L.* Where is the semantic system? A critical review and meta-analysis of 120 functional neuroimaging studies // *Cereb. Cortex*. 2009. V. 19. № 12. P. 2767.
15. *Schell M., Friederici A.D., Zaccarella E.* Neural classification maps for distinct word combinations in Broca's area // *Front. Hum. Neurosci.* 2022. V. 16. P. 930849.
16. *Berkovich-Ohana A., Noy N., Harel M. et al.* Inter-participant consistency of language-processing networks during abstract thoughts // *NeuroImage*. 2020. V. 211. P. 116626.
17. *Fini C., Zannino G.D., Orsoni M. et al.* Articulatory suppression delays processing of abstract words: The role of inner speech // *Q. J. Exp. Psychol.* 2022. V. 75. № 7. P. 1343.
18. *Mashal N., Faust M., Hendler T.* The role of the right hemisphere in processing nonsalient metaphorical meanings: application of principal components analysis to fMRI data // *Neuropsychologia*. 2005. V. 43. № 14. P. 2084.
19. *Moro A., Tettamanti M., Perani D. et al.* Syntax and the brain: disentangling grammar by selective anomalies // *NeuroImage*. 2001. V. 13. № 1. P. 110.
20. *Friederici A.D., Opitz B., von Cramon D.Y.* Segregating semantic and syntactic aspects of processing in the hu-

- man brain: an fMRI investigation of different word types // *Cereb. Cortex*. 2000. V. 10. № 7. P. 698.
21. *Sabsevitz D.S., Medler D.A., Seidenberg M., Binder J.R.* Modulation of the semantic system by word imageability // *NeuroImage*. 2005. V. 27. № 1. P. 188.
 22. *Blank S.C., Bird H., Turkheimer F., Wise R.J.S.* Speech production after stroke: the role of the right pars opercularis // *Ann. Neurol*. 2003. V. 54. № 3. P. 310.
 23. *Scott S.K.* The neural control of volitional vocal production-from speech to identity, from social meaning to song // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci*. 2022. V. 377. № 1841. P. 20200395.
 24. *Reato D., Salvador R., Bikson M. et al.* Principles of transcranial direct current stimulation (tDCS): introduction to the biophysics of tDCS / Practical guide to transcranial direct current stimulation // Eds. Knotkova H., Nitsche M., Bikson M., Woods A. Springer, Cham, 2019. P. 45.
 25. *Roy A.V., Camchong J., Lim K.O.* Principles and applications of transcranial electrical stimulation / Engineering in Medicine: Advances and Challenges // Ed. Iaizzo P. Elsevier, 2018. P. 319.
 26. *Bianco G., Feurra M., Fadiga L. et al.* Bi-hemispheric effects on corticospinal excitability induced by repeated sessions of imagery versus observation of actions // *Restor. Neurol. Neurosci*. 2012. V. 30. № 6. P. 481.
 27. *Santarnecchi E., Feurra M., Barneschi F. et al.* Time course of corticospinal excitability and autonomic function interplay during and following monopolar tDCS // *Front. Psychiatry*. 2014. V. 5. P. 86.
 28. *de Vries M.H., Barth A.C., Maiworm S. et al.* Electrical stimulation of Broca's area enhances implicit learning of an artificial grammar // *J. Cogn. Neurosci*. 2010. V. 22. № 11. P. 2427.
 29. *Fiori V., Cipollari S., Di Paola M. et al.* tDCS stimulation segregates words in the brain: evidence from aphasia // *Front. Hum. Neurosci*. 2013. V. 7. P. 269.
 30. *Rosso C., Valabregue R., Arbizu C. et al.* Connectivity between right inferior frontal gyrus and supplementary motor area predicts after-effects of right frontal cathodal tDCS on picture naming speed // *Brain Stimul*. 2014. V. 7. № 1. P. 122.
 31. *Marangolo M., Fiori V., Gelfo F. et al.* Bihemispheric tDCS enhances language recovery but does not alter BDNF levels in chronic aphasic patients // *Restor. Neurol. Neurosci*. 2014. V. 32. № 2. P. 367.
 32. *de Aguiar V., Bastiaanse R., Capasso R. et al.* Can tDCS enhance item-specific effects and generalization after linguistically motivated aphasia therapy for verbs? // *Front. Behav. Neurosci*. 2015. V. 9. P. 190.
 33. *Matar S.J., Sorinola I.O., Newton C., Pavlou M.* Transcranial direct-current stimulation may improve discourse production in healthy older adults // *Front. Neurol*. 2020. V. 11. P. 935.
 34. *Schimke E.A.E., Angwin A.J., Cheng B.B.Y., Copland D.A.* The effect of sleep on novel word learning in healthy adults: A systematic review and meta-analysis // *Psychon. Bull. Rev*. 2021. V. 28. № 6. P. 1811.
 35. *Liu Y., van Hell J.G.* Learning novel word meanings: an ERP study on lexical consolidation in monolingual, inexperienced foreign language learners // *Language Learning*. 2020. V. 70. P. 45.
 36. *Bakker I., Takashima A., van Hell J.G. et al.* Competition from unseen or unheard novel words: lexical consolidation across modalities // *J. Mem. Lang*. 2014. V. 73. № 1. P. 116.
 37. *Partanen E., Leminen A., de Paoli S. et al.* Flexible, rapid and automatic neocortical word form acquisition mechanism in children as revealed by neuromagnetic brain response dynamics // *Neuroimage*. 2017. V. 155. P. 450.
 38. *Vasilyeva M.J., Knyazeva V.M., Aleksandrov A.A., Shtyrov Y.* Neurophysiological correlates of fast mapping of novel words in the adult brain // *Front. Hum. Neurosci*. 2019. V. 13. P. 304.
 39. *Ihara A.S., Mimura T., Soshi T. et al.* Facilitated lexical ambiguity processing by transcranial direct current stimulation over the left inferior frontal cortex // *J. Cogn. Neurosci*. 2015. V. 27. № 1. P. 26.
 40. *Kurmakaeva D., Blagovechtchenski E., Gnedykh D. et al.* Acquisition of concrete and abstract words is modulated by tDCS of Wernicke's area // *Sci. Rep*. 2021. V. 11. № 1. P. 1508.
 41. *Haro J., Guasch M., Vallès B., Ferré P.* Is pupillary response a reliable index of word recognition? Evidence from a delayed lexical decision task // *Behav. Res. Methods*. 2017. V. 49. № 5. P. 1930.
 42. *Perea M., Rosa E., Gómez C.* The frequency effect for pseudowords in the lexical decision task // *Percept. Psychophys*. 2005. V. 67. № 2. P. 301.
 43. *Monaghan J., Ellis A.W.* What exactly interacts with spelling-sound consistency in word naming? // *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn*. 2002. V. 28. № 1. P. 183.
 44. *Troche J., Crutch S., Reilly J.* Clustering, hierarchical organization, and the topography of abstract and concrete nouns // *Front. Psychol*. 2014. V. 5. P. 360.
 45. *Paivio A.* Mental representations: a dual coding approach. N. Y.: Oxford University Press, 1986. 322 p.
 46. *Руководство по функциональной межполушарной асимметрии.* М.: Научный мир, 2009. 836 с. Guide to functional hemispheric asymmetry. M.: "Scientific World" Publishing House, 2009. 836 p.
 47. *Nazarova M., Blagovechtchenski E.* Modern brain mapping – what do we map nowadays? // *Front. Psychiatry*. 2015. V. 6. P. 89.

The Involvement of Broca's Area and Its Right-Hemispheric Homologue in Acquiring Abstract and Concrete Semantics: Transcranial Direct-Current Stimulation Study

D. S. Gnedykh^{a, *}, E. D. Blagovechtchenski^b, S. N. Kostromina^a, N. A. Mkrtychian^a, Y. Y. Shtyrov^c

^a*Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

^b*Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg, Russia*

^c*Aarhus University, Aarhus, Denmark*

**E-mail: d.gnedyh@spbu.ru*

The study compared effects of transcranial direct current stimulation (tDCS) of Broca's area and of its right-hemispheric homologue on the acquisition of novel concrete and abstract words. Word/concept acquisition was achieved through reading sets of sentences, which incorporated novel words, gradually revealing their meaning through context. Before the learning session, a 15-minute anodal or cathodal stimulation of one of the target areas was applied. Lexical decision task was used to assess the learning outcomes immediately after the learning session and 24 hours later. The results showed a larger number of correct responses after right-hemispheric tDCS, in comparison with that of Broca's area in the left hemisphere. These results suggest that the right-hemispheric counterpart of Broca's areas is involved in the processing and acquisition of new concrete and abstract semantics. Furthermore, they demonstrate facilitatory effects of tDCS on the processes of overnight consolidation of newly formed word memory traces.

Keywords: transcranial direct current stimulation (micropolarization), Broca's area, Broca's area right-hemispheric homologue, concrete concepts, abstract concepts, word acquisition, learning, brain, language (speech), right hemisphere.

УДК 534.784+612.85+81.342

ВЛИЯНИЕ ВИЗУАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ РАССТОЯНИЯ ДО СЛУШАТЕЛЯ НА ЧАСТОТУ ОСНОВНОГО ТОНА ГОЛОСА ДИКТОРА В УСЛОВИЯХ ШУМА

© 2023 г. А. М. Луничкин¹, *, А. П. Гвоздева¹, И. Г. Андреева¹

¹ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии
имени И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: BolverkDC@mail.ru

Поступила в редакцию 30.11.2022 г.

После доработки 24.01.2023 г.

Принята к публикации 31.01.2023 г.

Ломбардная речь представляет собой непроизвольные адаптивные изменения голосообразования под влиянием шума. В данной работе была проверена гипотеза о взаимодействии непроизвольного слухоречевого контроля, характерного для нее, и произвольного контроля фонации, который возникает в результате визуальной оценки расстояния до слушателя. Оценивали частоту основного тона голоса (ЧОТ) при визуальной оценке расстояния между диктором и слушателем (1 и 4 м) в условиях шума многоголосия (60 и 72 дБ) и при фронтальном расположении последнего. В работе принимали участие 9 русскоязычных дикторов — женщин 20–35 лет с нормальным слухом. Получили повышение значений ЧОТ дикторов при усложнении коммуникативной ситуации как в случае усиления уровня фонового шума, так и при увеличении расстояния между диктором и слушателем. В тишине и при двух уровнях шума после увеличения расстояния до слушателя прирост значений ЧОТ (Δ ЧОТ) составил 14, 18 и 15 Гц, соответственно, и достоверно не различался ($p > 0.05$, $n = 288$). При сохранении коммуникативной дистанции шум многоголосия уровнем 60 и 72 дБ приводил к достоверно различающимся значениям Δ ЧОТ: при 1 м — 14 и 32 Гц ($p < 0.001$, $n = 288$), а при 4 м — 18 и 33 Гц ($p < 0.001$, $n = 288$), соответственно. Полученные данные свидетельствуют о независимом и аддитивном влиянии факторов шума и коммуникативного расстояния на фонацию.

Ключевые слова: акустика речи, шум многоголосия, слухоречевой контроль, эффект Ломбарда, речевая коммуникация, коммуникация на расстоянии, частота основного тона голоса.

DOI: 10.31857/S0131164622600987, **EDN:** GBDNUW

В процессе общения дикторы изменяют параметры своей речи как непроизвольно, так и произвольно, применяя коммуникативную стратегию. Оба способа контроля речи направлены на то, чтобы облегчить передачу речевого сигнала собеседнику. Согласно современным представлениям управление голосовой моторикой описывают при помощи модели нейронной сети, которая включает в себя две структурно и функционально различающиеся части, каждая из которых реализует один из способов контроля речи [1]. При этом непроизвольный контроль обеспечивается филогенетически древней первичной голосовой моторной сетью, в основном расположенной в подкорковых структурах.

Непроизвольные адаптивные изменения речи, которые возникают в шумной среде, получили название эффекта Ломбарда [2, 3]. Причем наряду с амплитудными изменениями характеристик голоса, происходят и его спектральные изменения [4–6]. Эти изменения состоят в увеличении

частоты основного тона (ЧОТ) голоса и первых формант гласных звуков, а так же в разнонаправленном изменении вторых и последующих формант. Латеральная ретикулярная формация и периаквадуктальное серое вещество (PAG) являются возможными слуховыми центрами в первичной вокально-моторной сети. Основным аргументом их участия в формировании эффекта Ломбарда являются многочисленные данные, полученные на млекопитающих [3, 7, 8].

Вторая часть нейросети представляет собой произвольную артикуляционную моторную сеть, берущую начало в вентролатеральной части префронтальной коры [1]. Взаимодействие двух частей нейросети будет приводить к тому, что изменения голоса диктора в условиях шума могут быть скорректированы произвольно. М. Garnier et al. обнаружили, что дикторы проявляют более сильный эффект Ломбарда в том случае, когда вовлечены в задачу интерактивного общения, и более слабый — при неинтерактивном чтении [9]. Эф-

эффект Ломбарда может быть существенно снижен или даже заблокирован при произвольном подержании уровня своего голоса в шуме с помощью обратной связи, которая позволяет визуализировать усилие голоса [10, 11]. У профессиональных хоровых певцов наблюдают более слабый эффект Ломбарда, чем у непрофессионалов, что обусловлено тренировкой [12, 13]. Таким образом, кортикальные процессы могут модулировать эффект Ломбарда как в направлении его активации, так и торможения.

По-видимому, на произвольный контроль может также оказывать влияние зрительная и слуховая информация о взаимном расположении диктора и слушателя. Эта информация позволяет оценить расстояние между ними и соответственно произвольно (осознанно) скорректировать силу голоса, поскольку увеличение коммуникативного расстояния приводит к снижению уровня звукового давления, создаваемого голосом диктора в месте расположения слушателя [14, 15].

В отличие от ситуации увеличения коммуникативного расстояния, рост уровня окружающего шума не только ухудшает разборчивость речи для слушателя за счет снижения соотношения речь/шум в месте прослушивания, но и затрудняет слухоречевой контроль собственной речи диктором. Таким образом, для диктора фактор шума может быть более сильным и оказывать большее влияние на параметры его голоса, чем фактор коммуникативного расстояния. Это предположение частично подтверждается результатами работы [14], в которой было продемонстрировано, что собеседники в большей степени склонны изменять амплитудные характеристики голоса в соответствии с уровнем окружающего шума, чем с изменением коммуникативного расстояния. Вместе с тем, вопрос о соотношении влияния факторов шума и расстояния при их совместном воздействии на частотные характеристики голоса остается открытым.

Целью настоящего исследования было сопоставить непроизвольный контроль голоса диктора в шуме и произвольный контроль его голоса при визуальной оценке расстояния до слушателя, находящегося в условиях сложной акустической сцены. Оценивали влияние на процесс фонации, в котором основную роль играют связи между первичной вокально-моторной сетью и первичным слуховым путем [16, 17]. Изменения фонации отражаются в ЧОТ, представляющей собой частоту колебания голосовых связок. По этой причине ЧОТ применяют в работах, направленных на оценку отдельных эффектов коммуникативного расстояния [14, 15] или окружающего шума [9, 18]. Визуальная оценка расстояния в настоящей работе была обеспечена при помощи метода “вызванной речи”, при котором диктор, об-

ращаясь к слушателю, повторял набор строго определенных слов. По сравнению со свободной коммуникацией данный метод исключал эмоциональную составляющую речи, неизбежно возникающую в диалоге.

МЕТОДИКА

В записи речи принимали участие 9 дикторов-женщин в возрасте 25–35 лет. Все дикторы являлись носителями русского языка и не имели нарушений слуха и дефектов речи.

Все дикторы, принимавшие участие в записях, проходили обследование слуха, которое включало тональную пороговую аудиометрию и тест обнаружения паузы. Последний позволял оценить временную разрешающую способность слуха дикторов для чистых тонов частотой 0,5, 1, 2 и 4 кГц, и широкополосных шелчков [19]. У всех дикторов пороги обнаружения паузы не превышали 20 мс, а пороги слуха на основных аудиометрических частотах — 20 дБ. Эти показатели соответствовали нормам тонального слуха и временной разрешающей способности.

Речевой материал. В качестве речевого материала применяли 8 двусложных слов русского языка: с ударением на первый слог — “почва”, “ручка”, “выпуск”, “плата”; с ударением на второй слог — “рубеж”, “строка”, “набор”, “кредит”.

Маскирующий сигнал. В качестве маскирующего сигнала использовали шум многоголосия (далее — шум), который создавали микшируя записи слов, описанных в разделе Речевой материал, произнесенных четырьмя дикторами, которые не принимали участие в данном исследовании (двумя мужчинами — 30 и 65 лет, и двумя женщинами — 19 и 60 лет). Частоты основного тона голоса для дикторов-мужчин составляли 117 ± 8 и 139 ± 9 Гц, соответственно, а для женщин — 208 ± 30 и 234 ± 34 Гц, соответственно. Длительность записей слов составляла от 400 до 800 мс. Для каждого слова каждого диктора создавалась звуковая дорожка с многократным повтором слова без пауз. Таким способом были получены 32 звуковые дорожки (8 слов $\times$ 4 диктора). Для создания шума они были микшированы в файл длительностью 40 с. Полученный шум многоголосия нормализовали по уровню, после чего сформировали линейные фронты нарастания и убывания интенсивности по 1 с. Данная методика формирования шума в подробностях описана в работе [20]. Шум многоголосия, при его предъявлении в наушниках, создавал у слушателя ощущение нахождения в комнате, где одновременно говорит множество людей. Измеренный в А-взвешенном режиме уровень звукового давления шума при монофоническом воспроизведении составлял 52 и 64 дБ (А). При диотическом предъявлении шума в условиях экс-

перимента этот уровень соответствовал воспринимаемому уровню громкости моноаурально подаваемого шума 60 и 72 дБ, что обусловлено эффектом бинауральной суммации громкости [21]. Далее по тексту уровни шума указаны с учетом этого эффекта.

Оборудование и экспериментальное помещение. Исследование проводили в анэхоидной звукоизолированной камере объемом 62,5 м³. Ослабление уровня наружных шумов в камере составляло не менее 40 дБ в диапазоне частот 0,5–16 кГц. Воспроизведение шума и запись голоса диктора выполняли синхронно с применением ноутбука *ASUS Sonic Master* и программного обеспечения *Adobe Audition 1.6*.

Для записи голоса использовали устройство *Rode NT-USB*, сочетающее в себе конденсаторный микрофон с кардиоидной диаграммой направленности и аналогово-цифровой преобразователь (звуковую карту) с частотой дискретизации 44100 Гц и разрядностью 16 бит. Устройство *Rode NT-USB* было оснащено выходом, к которому подключали головные телефоны закрытого типа *Sennheiser HD-380-Pro*, использовавшееся для подачи диктору шумового сигнала и организации слуховой обратной связи (самопрослушивания, см. далее). Измерение уровня звукового давления шума осуществляли при помощи шумомера *RFT 000014* в А-взвешенном режиме при моноауральной подаче звука.

Настройка самопрослушивания. Головные телефоны уменьшали воспринимаемую диктором громкость собственной речи, поэтому их применение могло влиять на параметры речи диктора (например, ее интенсивность и ЧОТ). Для снижения этого эффекта перед началом эксперимента диктора просили выполнить регулировку самопрослушивания. С этой целью диктор настраивал усиление подаваемого в наушники сигнала с микрофона при помощи регулятора на устройстве *Rode NT-USB* таким образом, чтобы воспринимаемая громкость собственной речи в головных телефонах и без них была одинаковой. Настроенное диктором перед началом эксперимента усиление собственного голоса (самопрослушивание) сохранялись при произнесении слов в тишине и в шуме.

Экспериментальная процедура. Во время эксперимента диктор располагался в анэхоидной камере в кресле с подлокотниками и подголовником. В 20 см от диктора, на уровне его губ, устанавливали микрофонное устройство на напольной стойке. Жесткая фиксация положения головы не применялась, однако во время эксперимента диктора просили держать затылок прижатым к подголовнику, а также не наклонять и не поворачивать голову. На дикторе были надеты головные телефоны закрытого типа. После настройки са-

мопрослушивания выполняли запись слов. Схема экспериментальной процедуры представлена на рис. 1. Каждый диктор участвовал в четырех сессиях записи, различавшиеся набором слов и дистанцией до слушателя (экспериментатора). Между сессиями диктор молчал. В течение одной сессии диктор, обращаясь к экспериментатору, лицо которого мог видеть, произносил по четыре раза друг за другом четыре слова в следующих условиях: 1) в тишине, 2) в шуме многоголосия при его уровне 60 дБ, 3) в шуме многоголосия при его уровне 72 дБ. Во время первых двух сессий экспериментатор располагался напротив диктора на расстоянии 1 м, во время вторых двух сессий — на расстоянии 4 м. Для того, чтобы уменьшить различия в интонировании слов, дикторов просили перед каждым словом добавлять местоимение “это”: “это — кредит, это — набор, это — выпуск, это — плата” и т.д. Во время записи слов слушатель поддерживал зрительный контакт с диктором, сохраняя молчание и не комментируя каким-либо образом произнесение диктором слов. После окончания сессии ее сохраняли в формате “wav”. Для каждого из девяти дикторов было записано 192 звуковых фрагмента (8 слов × 4 повтора × 3 условия × 2 расстояния). Общий объем речевого материала для девяти дикторов составил 1728 записей слов.

Анализ записей и методы статистического анализа. Определение ЧОТ дикторов производили в программе *Praat* (свободно распространяемое программное обеспечение, www.praat.org). В окне программы в каждом записанном звуковом фрагменте по рисунку звуковой волны определяли начало и конец произнесенного диктором слова, игнорируя местоимение “это” и любые следовые шумы, создаваемые диктором после озвучивания слова. Значение ЧОТ рассчитывали при помощи функции “*get pitch*”, как среднее всех значений в слове. Частотный диапазон для оценки ЧОТ составлял 75–500 Гц. Статистическую обработку и визуализацию полученных данных проводили в программах *Excel* и *Statistica 10*. Оценку достоверности различий величины ЧОТ у отдельных дикторов в разных условиях шумовой нагрузки и при разных коммуникативных расстояниях выполняли при помощи непараметрического парного критерия Вилкоксона, внося поправку Бонферрони на множественные сравнения. Контрольным условием считали говорение в тишине при расстоянии между диктором и слушателем соответствовавшем 1 м. Выполняли расчет изменений частоты основного тона (Δ ЧОТ) по сравнению с контролем в следующих условиях: 1) шум 60 дБ, расстояние 1 м; 2) шум 72 дБ, расстояние 1 м; 3) тишина, расстояние 4 м; 4) шум 60 дБ, расстояние 4 м; 5) шум 72 дБ, расстояние 4 м. Кроме того, вычисляли изменения ЧОТ с увеличением расстояния при одинаковой шумовой нагрузке или в

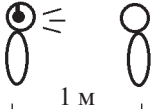
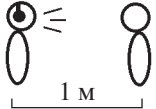
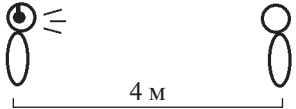
	Тишина	Шум 60 дБ	Шум 72 дБ	
Сессия 1	(C1, C2, C3, C4) × 4	(C1, C2, C3, C4) × 4	(C1, C2, C3, C4) × 4	
Сессия 2	(C5, C6, C7, C8) × 4	(C5, C6, C7, C8) × 4	(C5, C6, C7, C8) × 4	
Сессия 3	(C1, C2, C3, C4) × 4	(C1, C2, C3, C4) × 4	(C1, C2, C3, C4) × 4	
Сессия 4	(C5, C6, C7, C8) × 4	(C5, C6, C7, C8) × 4	(C5, C6, C7, C8) × 4	

Рис. 1. Схема эксперимента по записи речи дикторов.

Каждый эксперимент состоял из четырех сессий записи двусложных слов русского языка (слова обозначены как C1, C2...C8). В сессиях 1 и 2 расстояние до слушателя составляло 1 м, в сессиях 3 и 4 — 4 м. В каждой сессии дикторы повторяли четыре слова друг за другом по четыре раза в тишине, в шуме 60 дБ и в шуме 72 дБ, обращаясь к слушателю.

ее отсутствии (тишина) — $\Delta\text{ЧОТ}(r)$, а также с увеличением шумовой нагрузки от 0 до 60 и от 0 до 72 дБ при неизменном коммуникативном расстоянии — $\Delta\text{ЧОТ}(l)$. Массив данных о ЧОТ и $\Delta\text{ЧОТ}$ проверяли на нормальность распределения при помощи теста Колмогорова–Смирнова и на однородность дисперсии при помощи теста Левена. Различия между значениями ЧОТ, $\Delta\text{ЧОТ}$, рассчитанными относительно контрольного значения, между $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ и между $\Delta\text{ЧОТ}(l)$ для всей группы дикторов оценивали при помощи непараметрического парного критерия Вилкоксона. Вносили поправку Бонферрони на множественные сравнения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для коммуникативных ситуаций, характеризующихся разной степенью сложности и ролью произвольного и непроизвольного контроля голоса, были определены значения ЧОТ голоса русской речи девяти дикторов-женщин (табл. 1). Были вычислены изменения ЧОТ относительно контроля ($\Delta\text{ЧОТ}$), изменения уровня шумовой нагрузки $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ и изменения фактора расстояния $\Delta\text{ЧОТ}(l)$. При проверке тестом Колмогорова–Смирнова массивов данных для ЧОТ и $\Delta\text{ЧОТ}$ установили отсутствие нормального распределе-

ния ($p < 0.01$, $n = 1728$), а тест Левена показал отсутствие в выборках соответствующих разным условиям равной дисперсии ($p < 0.01$, $n = 288$), поэтому применение дисперсионного анализа ANOVA представлялось некорректным.

На рис. 2 представлены примеры изменений значений ЧОТ в слове “Рубеж”, произнесенного диктором № 3 при разной шумовой нагрузке и расстоянии до слушателя. По данным рис. 2 видно, что усложнение ситуации коммуникации, по сравнению с контролем за счет усиления шума и/или увеличения коммуникативной дистанции, приводило к росту значений ЧОТ дикторов при произнесении слова. В дальнейшем были проанализированы средние значения ЧОТ в слове. Расчет средних значений ЧОТ всегда осуществляли на всем протяжении слова, несмотря на то, что при усложнении коммуникативной ситуации наблюдалось увеличение длительности слов.

Диктор № 1 менял ЧОТ в незначительной степени, при этом достоверные отличия от контрольного условия были получены только в многоголосии уровнем 72 дБ при коммуникативном расстоянии 4 м ($p < 0.01$, $n = 32$, здесь и далее используется непараметрический парный критерий Вилкоксона). У остальных восьми дикторов любое усложнение коммуникативной ситуации вызывало достоверное увеличение ЧОТ относительно

Таблица 1. Индивидуальные значения частоты основного тона голоса (ЧОТ) дикторов при произнесении слов в условиях с разной шумовой нагрузкой и разным расстоянии до слушателя

Диктор (№/возраст)	Частота основного тона, Гц					
	1 м			4 м		
	тишина 0 дБ	шум 60 дБ	шум 72 дБ	тишина 0 дБ	шум 60 дБ	шум 72 дБ
№ 1/20	229 ± 23*	233 ± 14	237 ± 9	231 ± 7	233 ± 7	237 ± 5
№ 2/20	186 ± 23	192 ± 13	217 ± 15	202 ± 17	220 ± 14	242 ± 14
№ 3/20	196 ± 21	240 ± 10	274 ± 9	235 ± 13	280 ± 14	311 ± 19
№ 4/26	199 ± 13	209 ± 12	225 ± 13	209 ± 13	229 ± 15	237 ± 15
№ 5/28	198 ± 16	214 ± 17	258 ± 8	218 ± 8	244 ± 10	275 ± 13
№ 6/29	186 ± 11	205 ± 5	217 ± 10	203 ± 14	215 ± 8	223 ± 11
№ 7/30	201 ± 29	210 ± 31	214 ± 27	206 ± 23	226 ± 39	227 ± 35
№ 8/33	175 ± 15	187 ± 12	204 ± 13	184 ± 15	201 ± 14	218 ± 13
№ 9/35	157 ± 12	164 ± 11	169 ± 12	169 ± 18	173 ± 13	183 ± 3

Примечание: * — приведено среднее значение и стандартное отклонение по всем записям диктора для 8 слов и 4 их повторений ($n = 32$).

контроля ($p < 0.01$, $n = 32$). Индивидуальное повышение ЧОТ в усложненных условиях коммуникации между дикторами различалось. Наименьшая степень увеличения обнаружена у диктора № 1 — с 229 Гц в контроле до 237 Гц при многоголосии 72 дБ, расстоянии 4 м; наибольшая — у диктора № 3, значения ЧОТ которого в контроле и в шуме многоголосия при расстоянии 4 м составили 196 и

311 Гц, соответственно. Значения ЧОТ дикторов в шуме 72 дБ были больше, чем в условиях многоголосия 60 дБ с равной дистанцией до слушателя ($p < 0.01$, $n = 32$). При одинаковом уровне помехи индивидуальные ЧОТ дикторов № 2–9 были выше в случае, когда расстояние составляло 4 м ($p < 0.01$, $n = 32$), в то время как у диктора № 1 расстояние не влияло на ЧОТ при постоянном уровне шума.

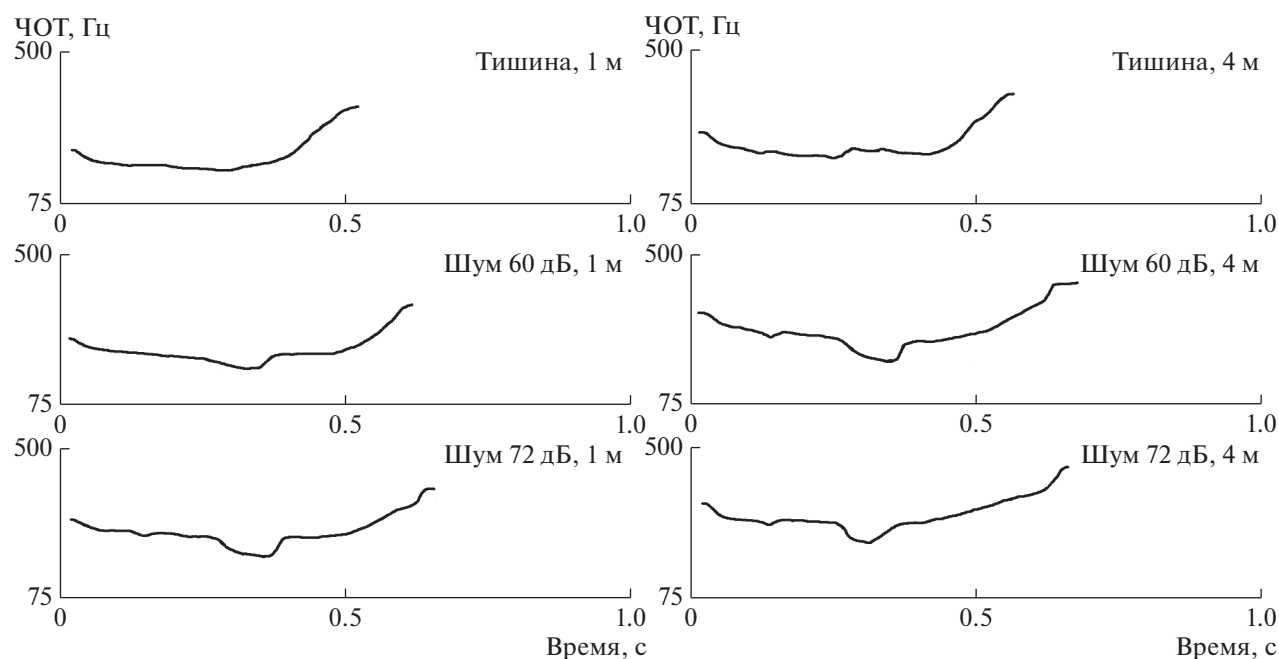


Рис. 2. Примеры изменения значений частоты основного тона при произнесении слова “Рубеж” диктором № 3 в разных экспериментальных условиях.

По оси абсцисс — время произнесения, с; по оси ординат — частота основного тона, Гц.

Индивидуальная вариабельность значений ЧОТ также различалась у разных дикторов. У части из них (например, дикторы № 1, 2, 8) затруднение коммуникативной ситуации приводило к снижению вариабельности показателей частоты основного тона. У других дикторов вариабельность ЧОТ при усилении помехи, напротив, увеличивалась (диктор № 4) или же не имела однозначного характера изменений (дикторы № 3, 7).

При последовательном усложнении акустической сцены для слушателя менялся диапазон значений ЧОТ дикторов. В контроле он составлял от 157 до 229 Гц (72 Гц), тогда как в условиях наиболее сложной коммуникативной ситуации (многоголосие 72 дБ, 4 м) диапазон возрастал на треть по сравнению с контролем — от 218 до 311 Гц (93 Гц). Это расширение диапазона в сложной коммуникативной ситуации было обусловлено тем, что под влиянием факторов разные дикторы меняли голос в различной степени. Учитывая это, влияние факторов на голос определяли не по абсолютным значениям ЧОТ, а по их изменениям в условиях разных акустических сцен.

При сохранении уровня помехи, средний показатель ЧОТ в группе был выше в случае, когда коммуникативное расстояние равнялось 4 м ($p < 0.001$ для тишины, $p < 0.001$ для шума 60 дБ, $p < 0.001$ для шума 72 дБ, $n = 288$). Значения $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ по группе составили 14 ± 4 Гц в тишине, 18 ± 4 Гц в многоголосии уровнем 60 дБ, 15 ± 4 Гц в многоголосии уровнем 72 дБ (рис. 3). При этом анализ полученных значений $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ показал, что различий между $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ в разных условиях не выявлялось ($p > 0.05$ для тишины и 60 дБ; $p > 0.05$ для тишины и 72 дБ; $p > 0.05$ для 60 и 72 дБ, $n = 288$).

Значения $\Delta\text{ЧОТ}(l)$, полученные при усилении шумовой нагрузки с тишины до 60 дБ и с тишины до 72 дБ, достоверно различались между собой как при дистанции 1 м ($p < 0.001$, $n = 288$), так и при дистанции 4 м ($p < 0.001$, $n = 288$) (рис. 4). При расстоянии между диктором и слушателем равном 1 м усиление многоголосия от 0 до 60 дБ приводило к средним значениям $\Delta\text{ЧОТ}(l)$ 14 ± 4 Гц, до 72 дБ — 32 ± 8 Гц. При удалении слушателя на 4 м $\Delta\text{ЧОТ}(l)$ были равны 18 ± 4 и 33 ± 7 дБ, соответственно. Важно отметить, что $\Delta\text{ЧОТ}(l)$ для двух коммуникационных расстояний при говорении в равном шуме не различались (при шуме 60 дБ $p > 0.05$, $n = 288$; при шуме 72 дБ $p > 0.05$, $n = 288$).

Совместное действие факторов шумовой помехи и расстояния по отношению к контрольным условиям приводило к $\Delta\text{ЧОТ}$ равному 32 ± 8 Гц в шуме 60 дБ при дистанции 4 м; 47 ± 11 Гц в шуме 72 дБ при дистанции 4 м. Полученные значения статистически различались ($p < 0.001$, $n = 288$).

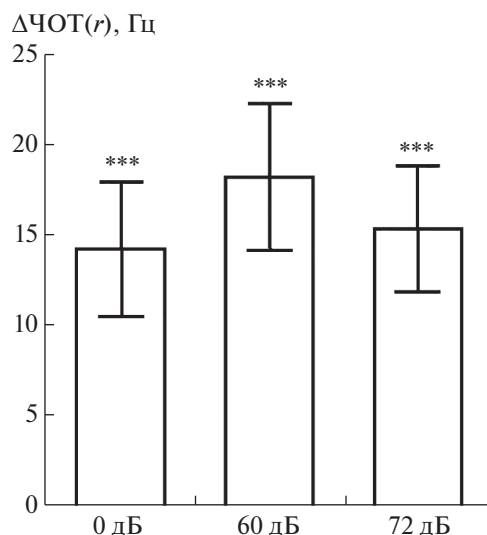


Рис. 3. Средние значения изменения частоты основного тона в группе из девяти дикторов при увеличении расстояния между диктором и слушателем от 1 до 4 м при сохранении уровня помехи ($\Delta\text{ЧОТ}(r)$). По оси абсцисс — условия говорения: 0 дБ — тишина; 60 дБ — многоголосие уровня 60 дБ; 72 дБ — многоголосие уровня 72 дБ. По оси ординат — $\Delta\text{ЧОТ}(r)$, Гц. *** — достоверно значимый прирост $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ при расстоянии 4 м относительно 1 м ($p < 0.001$, $n = 288$, непараметрический парный критерий Вилкоксона).

Анализ значений $\Delta\text{ЧОТ}$ в коммуникативных ситуациях, усложненных по сравнению с контролем, показал сходство изменений ЧОТ при ряде сочетаний двух факторов. Значения $\Delta\text{ЧОТ}$, полученные при говорении в многоголосии уровнем 60 дБ при коммуникативном расстоянии 1 м и тишине при расстоянии 4 м, не различались между собой ($p > 0.05$, $n = 288$). Значения $\Delta\text{ЧОТ}$ при предъявлении шума уровнем 72 дБ с дистанцией 1 м и шума 60 дБ дистанцией 4 м, также достоверно не различались ($p > 0.05$, $n = 288$). Наибольшее значение прироста ЧОТ было получено при шумовой нагрузке уровнем 72 дБ и увеличении коммуникативного расстояния до 4 м. В этом сочетании факторов $\Delta\text{ЧОТ}$ было достоверно выше, чем в остальных изученных ($p < 0.001$, $n = 288$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Изменения частоты основного тона голоса с расстоянием оказались практически одинаковыми в условиях тишины и при обоих уровнях шума. Полученные значения $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ в тишине составили по средним данным 14 Гц. При росте коммуникативного расстояния $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ увеличивался на 18 и 15 Гц в условиях шума 60 и 72 дБ, соответственно. Различие в $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ для всех трех случаев было недостоверным. Таким образом, шум среднего уровня интенсивности не влиял на из-

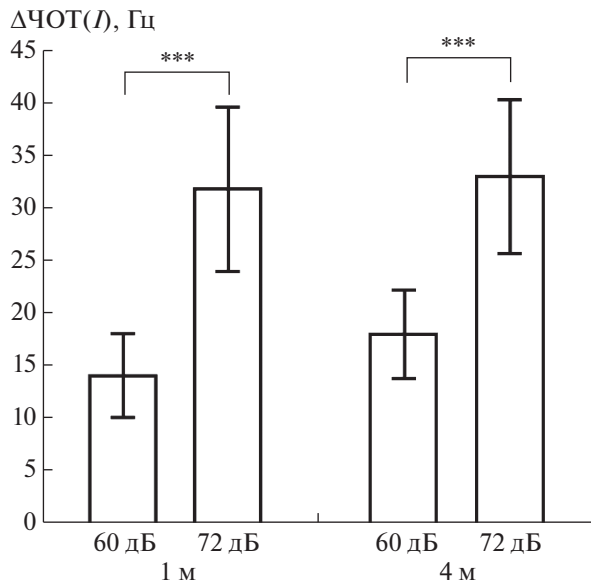


Рис. 4. Средние значения изменения частоты основного тона в группе из девяти дикторов при усилении шумовой нагрузки с тишины до 60 дБ и с тишины до 72 дБ при неизменном коммуникативном расстоянии ($\Delta\text{ЧОТ}(Л)$).

По оси абсцисс — условия говорения: 0 дБ — тишина; 60 дБ — многоголосие уровня 60 дБ; 72 дБ — многоголосие уровня 72 дБ; 1 и 4 м — коммуникативное расстояние. По оси ординат — $\Delta\text{ЧОТ}(Л)$, Гц. *** — достоверные различия между уровнями шумовой нагрузки 60 и 72 дБ ($p < 0.001$, $n = 288$, непараметрический парный критерий Вилкоксона).

менения фонации при увеличении расстояния до слушателя.

При увеличении уровня шума от 60 до 72 дБ получили близкие значения увеличения $\Delta\text{ЧОТ}(Л)$ — 15 и 18 Гц для обоих расстояний 1 и 4 м, соответственно. Эти значения $\Delta\text{ЧОТ}(Л)$ достоверно не различались, что указывает на отсутствие влияния расстояния до слушателя на произвольные изменения фонации при повышении уровня шума.

Таким образом, при росте коммуникативного расстояния и при повышении уровня шумовой помехи регистрировали увеличение ЧОТ голоса, что соответствовало известным данным литературы при раздельной оценке действия этих факторов [9, 14, 15, 18]. Причем, сходство значений $\Delta\text{ЧОТ}(Л)$ и $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ свидетельствует о близком по величине воздействию двух разных факторов — шума и увеличения расстояния, затрудняющих коммуникацию и влияющих на фонацию разными путями, т.е. посредством произвольного и произвольного контроля. Значения обоих факторов, усложняющих коммуникацию, были подобраны нами в соответствии с представлением о том, что увеличение расстояния в четыре раза должно уменьшать уровень звука в месте прослушивания на 12 дБ. Согласно данным литературы

удвоение расстояния снижает уровень сигнала на 6 дБ в условиях свободного поля [22].

В случае увеличения шумовой нагрузки снижается слуховой контроль диктором собственного голоса из-за нарушения самопрослушивания, причем изменения фонации возникают произвольно. В обычных условиях, когда шум присутствует в окружающей среде, а не подается в наушники, как в нашем эксперименте, он также затрудняет распознавание речи для слушателя. В случае увеличения коммуникативного расстояния, нарушения обратной слухоречевой связи не происходит, но у слушателя возникают затруднения, обусловленные снижением уровня поступающего сигнала. Это усложнение коммуникативной ситуации может вызывать адаптивные изменения голоса диктора только за счет произвольного контроля при визуальной оценке расстояния, т.к. слушатель по условиям эксперимента молчит на протяжении всего периода регистрации голоса. Таким образом, используя разные способы контроля голоса и, тем самым, задействуя разные нейронные сети, мы при сходном усложнении коммуникативной ситуации получили одинаковые изменения голоса, что свидетельствует о независимом влиянии на фонацию произвольного и произвольного механизма контроля голоса. Обратного эффекта, т.е. снижения ЧОТ при усложнении коммуникативной ситуации, а, следовательно, неспособности диктора менять фонацию адекватно меняющимся условиям, обнаружено не было. Напротив, было получено аддитивное влияние изученных факторов на частоту основного тона, т.е. увеличение шума на 12 дБ при дистанции 1 м давало тот же эффект, что и увеличение расстояния с 1 до 4 м.

Полученные нами значения $\Delta\text{ЧОТ}(r)$ в тишине составили по средним данным 14 Гц и согласовывались с изменениями частоты для сходного диапазона расстояний. Наша оценка приращения частоты основного тона оказалась выше, чем в работе [18] — около 7 Гц, но ниже чем в работе [23] — около 35–39 Гц. В еще одной работе [24] наблюдался широкий разброс индивидуальных значений $\Delta\text{ЧОТ}$ от 8 до 40 Гц, что согласуется с обнаруженным нами высоким уровнем межиндивидуальной вариативности. Различия данных, полученных в разных исследованиях, можно связать с рядом факторов. Во-первых, с условиями записи голоса: в работе [24] она производилась на улице, на фермерском поле, в нашем исследовании и работах [18, 23] в звукозаглушенных анаэодных камерах. В работе [18] показано, что прирост ЧОТ в камере был выше на 4 Гц, чем в других исследованных помещениях. Во-вторых, с полом дикторов — в работе [18] изучали голоса только мужчин, в то время как в работе [23] мужчина увеличивал ЧОТ в меньшей степени, чем женщины. В-третьих, необходимо учитывать индивидуальные особенности

дикторов и малые выборки. В записи голоса [24] принимало участие четыре человека, в [23] — всего три, тогда как нами показана высокая вариативность Δ ЧОТ в группе дикторов. Таким образом, оценка изменений ЧОТ при увеличении расстояния, выполненная в нашем исследовании с применением метода вызванной речи, показала хорошее соответствие с результатами ранее выполненных работ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Речепродукция включает в себя согласованный контроль множества нейромоторных систем, включая артикуляцию, фонацию и дыхание. Контроль фонации обеспечивается прямой и обратной связью. Если обнаруживается несоответствие между прямой и слуховой обратной связью, то к речевым мышцам посылаются корректирующие команды для подстройки голоса. Во время фонации в шумной обстановке возникает несоответствие между прямой и слуховой обратной связью [25, 26]. Данные авторов настоящей статьи свидетельствуют о том, что произвольный контроль под влиянием визуальной оценки расстояния может вызывать сходные по величине с действием шума изменения фонации. Причем при средних уровнях шума и типичных коммуникативных расстояниях оба фактора — шум и коммуникативное расстояние, действуют независимо и аддитивно.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова (Санкт-Петербург).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Данное исследование поддержано средствами РФФИ (проект № 22-25-00068).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. А.М. Луничкин, И.Г. Андреева, А.П. Гвоздева — идея работы и планирование эксперимента, А.П. Гвоздева — подготовка методики, А.М. Луничкин — сбор и обработка данных, А.М. Луничкин, И.Г. Андреева, А.П. Гвоздева — написание и редактирование манускрипта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hage S.R., Nieder A. Dual neural network model for the evolution of speech and language // *Trends Neurosci.* 2016. V. 39. № 12. P. 813.
2. Brumm H., Zollinger S.A. The evolution of the Lombard effect: 100 years of psychoacoustic research // *Behaviour.* 2011. V. 148. № 11–13. P. 1173.
3. Luo J., Hage S.R., Moss C.F. The Lombard effect: from acoustics to neural mechanisms // *Trends Neurosci.* 2018. V. 41. № 12. P. 938.
4. Liénard J.S., Di Benedetto M.G. Effect of vocal effort on spectral properties of vowels // *J. Acoust. Soc. Am.* 1999. V. 106. № 1. P. 411.
5. Traunmüller H., Eriksson A. Acoustic effects of variation in vocal effort by men, women, and children // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 107. № 6. P. 3438.
6. Koenig L.L., Fuchs S. Vowel formants in normal and loud speech // *J. Speech Lang. Hear. Res.* 2019. V. 62. № 5. P. 1278.
7. Nonaka S., Takahashi R., Enomoto K. et al. Lombard reflex during PAG-induced vocalization in decerebrate cats // *Neurosci. Res.* 1997. V. 29. № 4. P. 283.
8. Hage S.R., Jürgens U., Ehret G. Audio–vocal interaction in the pontine brainstem during self-initiated vocalization in the squirrel monkey // *Eur. J. Neurosci.* 2006. V. 23. № 12. P. 3297.
9. Garnier M., Henrich N., Dubois D. Influence of Sound Immersion and Communicative Interaction on the Lombard Effect // *J. Speech Lang. Hear. Res.* 2010. V. 53. № 3. P. 588.
10. Pick H.L., Jr., Siegel G.M., Fox P.W. et al. Inhibiting the Lombard effect // *J. Acoust. Soc. Am.* 1989. V. 85. № 2. P. 894.
11. Therrien A.S., Lyons J., Balasubramaniam R. Sensory attenuation of self-produced feedback: the Lombard effect revisited // *PLoS One.* 2012. V. 7. № 11. P. e49370.
12. Tonkinson S. The Lombard effect in choral singing // *J. Voice.* 1994. V. 8. № 1. P. 24.
13. Bottalico P., Graetzer S., Hunter E.J. Effect of training and level of external auditory feedback on the singing voice: volume and quality // *J. Voice.* 2016. V. 30. № 4. P. 434.
14. Weisser A., Miles K., Richardson M.J., Buchholz J.M. Conversational distance adaptation in noise and its effect on signal-to-noise ratio in realistic listening environments // *J. Acoust. Soc. Am.* 2021. V. 149. № 4. P. 2896.
15. Fux T., Feng G., Zimpfer V. Talker-to-listener distance effects on the variations of the intensity and the fundamental frequency of speech / 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), May 22–27, 2011. P. 4964.
16. Hage S.R., Jürgens U. On the role of the pontine brainstem in vocal pattern generation: a telemetric single-unit recording study in the squirrel monkey // *J. Neurosci.* 2006. V. 26. № 26. P. 7105.
17. Pieper F., Jürgens U. Neuronal activity in the inferior colliculus and bordering structures during vocalization in the squirrel monkey // *Brain Res.* 2003. V. 979. № 1–2. P. 153.

18. *Pelegrín-García D., Smits B., Brunskog J., Jeong C.H.* Vocal effort with changing talker-to-listener distance in different acoustic environments // *J. Acoust. Soc. Am.* 2011. V. 129. № 4. P. 1981.
19. *Keith R.W.* Development and standardization of SCAN-C Test for Auditory Processing Disorders in Children // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 11. № 8. P. 438.
20. *Andreeva I.G., Dymnikowa M., Gvozdeva A.P. et al.* Spatial separation benefit for speech detection in multi-talker babble-noise with different egocentric distances // *Acta. Acust. United Acust.* 2019. V. 105. № 3. P. 484.
21. *Marks L.E.* Binaural summation of loudness: Noise and two-tone complexes // *Percept. Psychophys.* 1980. V. 27. № 6. P. 489.
22. *Coleman P.D.* An analysis of cues to auditory depth perception in free space // *Psychol. Bull.* 1963. V. 60. № 3. P. 302.
23. *Shih C., Lu H.Y.D.* Effects of talker-to-listener distance on tone // *J. Phon.* 2015. V. 51. P. 6.
24. *Cheyne H.A., Kalgaonkar K., Clements M., Zurek P.* Talker-to-listener distance effects on speech production and perception // *J. Acoust. Soc. Am.* 2009. V. 126. № 4. P. 2052.
25. *Meekings S., Evans S., Lavan N. et al.* Distinct neural systems recruited when speech production is modulated by different masking sounds // *J. Acoust. Soc. Am.* 2016. V. 140. № 1. P. 8.
26. *Meekings S., Scott S.K.* Error in the Superior Temporal Gyrus? A Systematic Review and Activation Likelihood Estimation Meta-Analysis of Speech Production Studies // *J. Cogn. Neurosci.* 2021. V. 33. № 3. P. 422.

The Impact of Visual Estimates of Talker-to-Listener Distance on Fundamental Frequency in Noise

A. M. Lunichkin^{a,*}, A. P. Gvozdeva^a, I. G. Andreeva^a

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry RAS, St. Petersburg, Russia*

^{*}*E-mail: BolverkDC@mail.ru*

Lombard speech is an involuntary adaptive changes in voicing under the influence of noise. In the current work we examine the relationship between involuntary auditory-speech control, common for the Lombard speech, and voluntary control of phonation which occurs as a result of the visual estimation of the distance to the listener. Fundamental frequencies (F0) were estimated in 9 Russian normally hearing female speakers aged 20–35 years. An increase in F0 was obtained when the communicative conditions became more complex in both increase in surrounding background noise level and growth of talker-to-listener distance cases. In quiet and in noise of 60 and 72 dB the increase in talker-to-listener distance led to F0 increments of 14, 18 and 15 Hz, which did not differ significantly from each other ($p > 0.05$, $n = 288$). When the communicative distance held constant, babble noise of different levels led to significantly different values of $\Delta F0$: for 1 m distance – 14 and 32 Hz ($p < 0.001$, $n = 288$), and for 4 m – 18 and 33 Hz ($p < 0.001$, $n = 288$), respectively. The data obtained evidence independent and additive impact of noise and communicative distance on phonation.

Keywords: speech acoustics, multi-talker babble noise, auditory-speech control, the Lombard effect, speech communication, communication at distance, voice fundamental frequency.

УДК 612.821,81'23,159.9.072.42

РИТМИЧЕСКАЯ ТРАНСКРАНИАЛЬНАЯ МАГНИТНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ ПЕРВИЧНОЙ МОТОРНОЙ КОРЫ ИЗБИРАТЕЛЬНО ВЛИЯЕТ НА УСВОЕНИЕ НОВЫХ СЛОВ В РАЗНЫХ СРЕДАХ ОБУЧЕНИЯ

© 2023 г. Е. И. Перикова¹ *, Е. Н. Блинова¹, Е. А. Андрющенко¹,
Е. Д. Благовещенский^{1,2}, О. В. Щербакова¹, Ю. Ю. Штыров³

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

³Орхусский университет, Орхус, Дания

*E-mail: e.perikova@spbu.ru

Поступила в редакцию 16.11.2022 г.

После доработки 27.01.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Моторная кора головного мозга (ГМ) человека задействуется на различных этапах речевого научения в том случае, если оно происходит одновременно с совершением двигательной активности. Однако в исследованиях, направленных на поиск причинно-следственных связей между активацией первичной моторной коры (М1) и эффективностью выполнения речевых задач, обнаруживаются противоречивые результаты, что, возможно, обусловлено различиями в средах обучения и характере двигательной активности, задействованной в экспериментальной процедуре. Целью данной работы стало исследование влияния активности моторной коры на эффективность запоминания новых слов при варьировании условий обучения и способа совершения моторного ответа. Активность моторной коры модулировалась при помощи ритмической транскраниальной магнитной стимуляции (рТМС) ГМ. После рТМС зоны М1 либо применения контрольных условий (плацебо-ТМС, активный контроль) участники исследования ($n = 96$) выполняли задания на усвоение новых слов посредством установления ассоциаций между визуально представленными изображениями предметов и аудиально предложенными словоформами в двух обучающих средах: при помощи компьютерного монитора либо в интерфейсе виртуальной реальности. В каждом условии испытуемым предъявлялись восемь новых слов с семантической привязкой и вопросом о визуальных характеристиках стимулов. Ответы на обучающие задания участники давали посредством выполнения дистальных высокоамплитудных движений рукой или проксимальных низкоамплитудных движений пальцами кисти. В качестве показателя эффективности усвоения новых слов использовалась правильность воспроизведения изученных слов сразу после обучения и на следующий день. В обеих средах обучения были обнаружены значимые различия в успешности воспроизведения новых слов сразу после стимуляции и на следующий день для испытуемых, получивших рТМС зоны М1 первичной моторной коры, в тех случаях, когда они давали ответы посредством совершения низкоамплитудных движений пальцами. Полученные результаты позволяют сделать вывод об участии моторной коры в речевом научении при интерактивном взаимодействии субъекта с обучающим материалом.

Ключевые слова: ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция, усвоение языка, речевое научение, речь, мозг, моторная кора, воплощенное познание, виртуальная реальность.

DOI: 10.31857/S0131164622600896, **EDN:** GEOSNG

Речь играет ключевую роль во всех сферах деятельности человека, а нарушения в системе обработки речевой информации значительно снижают качество жизни. Поэтому механизмы, лежащие в основе понимания и усвоения речи, являются предметом внимания специалистов различных направлений: нейробиологии, психологии и лингвистики.

Обращаясь к методологии изучения познавательных процессов в целом и языковых механизмов в частности, важно отметить, что в рамках традиционных теорий познания когнитивные и двигательные системы мозга рассматривались как независимые друг от друга в отношении реализуемых ими функций [1]. Однако становится все более очевидным, что двигательная активность является не просто следствием познавательной

деятельности человека, а скорее ее неотъемлемой частью [2]. Согласно теориям воплощенного познания, когнитивные процессы находятся в неразрывной связи с телесной организацией человека [2, 3]. Исследователи отмечают, что физическое взаимодействие человека со средой не только находится под контролем когнитивных функций, но и первоначально выступает в качестве основы их формирования [2].

Известно, что простое движение тела, такое как взмах руки или ноги, может оставлять значимый для системы памяти мнемический след и интегрироваться с когнитивными процессами, протекающими одновременно с совершением такого движения [4, 5]. Так, в ряде исследований у участников наблюдалось меньшее время реакции, когда им было необходимо оценивать глаголы, обозначающие движения руками, с помощью движений рук, в сравнении с ситуацией, когда эту же оценку нужно было осуществить, выполнив движение ногой [6]. Это позволяет предположить, что когнитивная обработка слова, обозначающего движение, требует задействования тех же моторных ресурсов, что и его реальное выполнение [7].

Результаты психофизиологических исследований показывают, что моторные зоны коры головного мозга (ГМ) принимают участие в различных этапах научения [8, 9]. В частности, в многочисленных работах показано существование функциональной связи между областью проекции руки в первичной моторной коре и нейрональными сетями, отвечающими за обработку речи [10]. Однако вопрос о характере связи речевых процессов и мозговых структур, отвечающих за двигательную активность, остается открытым.

Одним из способов уточнения природы таких взаимосвязей является использование методов неинвазивной стимуляции мозга, позволяющих выявить причинно-следственные отношения между изменением возбудимости различных областей ГМ и поведенческими эффектами. Наиболее распространенным методом неинвазивного воздействия на кору ГМ считается транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС), преимущество которой заключается в анатомической точности воздействия на мозг [11, 12]. Одним из наиболее эффективных протоколов ТМС, используемых для кратковременного локального изменения возбудимости коры ГМ, является ритмическая ТМС (pTMS) при помощи т.н. тета-вспышек (*continuous theta-burst stimulation, cTBS*), приводящая к снижению возбудимости моторной коры [13].

Результаты проведенных исследований речевой функции с использованием ТМС моторной коры демонстрируют противоречивые данные. В то время как в одних работах обнаруживаются связи между стимуляцией первичной моторной коры и эффективностью выполнения речевых за-

дач [10, 14], авторы других исследований не находят такой закономерности [15]. При этом результаты многих исследований показывают влияние стимуляции первичной моторной коры на эффективность выполнения речевых заданий только при определенных условиях, связанных с конкретным типом задач и наличием/отсутствием двигательной активности в процессе обучения. Так, *B. Tomasino et al.* [16] обнаружили, что ТМС первичной моторной коры влияла на обработку глаголов, обозначающих телесные действия, когда испытуемых прямо просили их прочитать, а затем представить, что они выполняют соответствующее действие, и оценить, требует ли оно вращения рукой (например, глаголы “гладить” или “хлопать”), в то время как при выполнении чисто речевых задач (только чтение) данный эффект не проявился. Аналогично, *J.K. Witt et al.* [17] пришли к выводу, что моторная система играет важную роль в назывании объектов, которыми можно манипулировать. Участникам исследования предлагалось сжимать мяч правой или левой рукой, и одновременно с этим им визуально предъявлялись изображения объектов на правой или левой половине монитора. В случае совпадения руки, сжимающей мяч, и стороны предъявления изображения испытуемые чаще ошибались и медленнее называли объекты. Однако в исследовании *N. Vukovic et al.* [10] было показано, что pTMS первичной моторной коры влияет на скорость поведенческих реакций при обработке не только глаголов, обозначающих телесные действия (например, “рисовать”), но и абстрактных глаголов (например, “веровать”), при этом эффект был обнаружен исключительно при выполнении испытуемыми семантического задания, но отсутствовал в случае выполнения более “низкоуровневой” задачи лексического решения.

Другим важным направлением исследований речевых функций, связанным с двигательной активностью, сенсорным опытом и кодированием информации в процессе обучения, является использование виртуальной реальности (VR) [18]. Исследования с использованием этой технологии показали ее большую эффективность в усвоении слов в сравнении с обучением посредством предъявления стимулов на мониторе компьютера [19–21] или на бумажных носителях [22]. В контексте теории воплощенного познания использование VR дает более широкие возможности для задействования разных способов двигательной активности в процессе научения по сравнению с традиционными методиками. Исследования, посвященные роли движений в усвоении речевой информации в VR среде, показали положительный эффект данной технологии [20, 23]. В исследовании *N. Vukovic et al.* [24] стимуляция первичной моторной коры была применена до выполнения испытуемыми заданий на усвоение новых слов в VR-сре-

де. Авторы пришли к выводу о том, что уменьшение возбудимости первичной моторной коры может отрицательно влиять на успешность усвоения слов, а также предотвращать микроструктурные изменения в областях коры ГМ, связанных с обработкой речи, формированием следов памяти и исполнительным контролем. Несмотря на свою актуальность, исследования с применением ВР на данный момент малочисленны; насколько нам известно, до настоящего момента не было проведено экспериментов, направленных на прямое сравнение влияния ТМС на эффективность обучения в ВР и традиционных средах.

Таким образом, целью данного исследования стало выявление влияния рТМС первичной моторной коры ГМ на эффективность усвоения новых слов при варьировании условий обучения и способа моторного ответа. Анализ литературных источников позволил выдвинуть предположение о том, что первичная моторная кора включена в процесс речевого научения в том случае, если субъект осуществляет двигательное взаимодействие с обучающим материалом. Для проверки этого предположения был использован протокол рТМС первичной моторной коры, применявшийся перед выполнением испытуемыми заданий на усвоение новых слов при варьировании условий обучения (при помощи традиционной среды — компьютерного монитора, либо ВР-среды), а также способа ответа на речевые задания (высокоамплитудные движения рукой, либо низкоамплитудные движения пальцами). Рабочая гипотеза исследования состояла в том, что испытуемые, получившие рТМС первичной моторной коры, будут воспроизводить большее количество слов в результате речевого научения с использованием низкоамплитудных движений пальцами в традиционной среде и высокоамплитудных движений рукой в ВР-среде, чем при использовании высокоамплитудных движений рукой в традиционной среде и низкоамплитудных движений пальцами в ВР-среде, соответственно. Контроль экспериментальных эффектов выполнялся при участии двух групп испытуемых, получавших плацебо-стимуляцию и стимуляцию срединной теменной области ГМ. Можно предположить, что в контрольных группах описанные ранее эффекты не будут обнаружены.

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 96 испытуемых в возрасте от 18 до 35 лет (средний возраст 22.5 ± 4.4 ; 69 женщин). Все испытуемые были право-рукими (доминирующую руку определяли при помощи Эдинбургского опросника [25]) носителями русского языка как единственного родного с нормальным или скорректированным до нормального зрением, не имевшими в анамнезе травм го-

ловы и неврологических или психиатрических заболеваний. С помощью процедуры псевдорандомизации испытуемые были распределены в три группы (по 32 чел. в каждой), получавшие разные типы рТМС: 1) реальную стимуляцию первичной моторной коры левого полушария ГМ, 2) реальную стимуляцию срединной теменной области ГМ в качестве т.н. активного контрольного условия и 3) плацебо-стимуляцию первичной моторной коры левого полушария ГМ — т. н. пассивный контроль. Экспериментальные группы значимо не различались по полу ($\chi^2(2) = 2.16$, $p = 0.34$), возрасту ($H(2) = 0.007$, $p = 0.99$) и уровню вербального ($F(2, 96) = 0.491$, $p = 0.61$) и невербального интеллекта, измеренного с помощью теста структуры интеллекта Р. Амтхауэра [26] ($F(2, 96) = 0.205$, $p = 0.81$). 52% испытуемых отметили, что не имели опыта работы с ВР до участия в эксперименте, 39% — что имели однократный опыт, а 9% — что использовали ВР с периодичностью раз в год.

Стимульный материал исследования был представлен набором визуальных стимулов и аудиозаписей, включавших в себя ранее неизвестные словоформы (псевдослова) и контекстные предложения для их семантизации. В эксперименте использовали 16 псевдослов, разработанных на основе реально существующих трехфонемных существительных русского языка и имеющих аналогичную данным существительным фонетическую структуру (согласный—гласный—согласный; например, *няч*). Семантическими референтами для них послужили наборы изображений (по 5 для каждого псевдослова) малоизвестных предметов быта и инструментов. Связь между псевдословами (далее — словами) и изображениями устанавливали посредством предложений, содержащих наименование предмета и вопрос, касающийся одной из его визуальных характеристик (например, *Это няч. Металлический ли он?*). Соответствие стимульных слов и изображений было уникальным для каждого испытуемого и определялось с помощью процедуры псевдорандомизации. Подробное описание процедуры разработки стимульного материала представлено в предыдущих работах авторов (см. например [27]).

Процедура исследования включала в себя следующие этапы: А) сессию транскраниальной магнитной стимуляции, Б) обучающую экспериментальную серию и В) проверку эффективности усвоения новых слов. Далее представлено подробное описание всех блоков экспериментальной процедуры, а схема реализации ее первого и второго этапов отражена на рис. 1.

После подписания информированного согласия каждый испытуемый проходил сессию *транскраниальной магнитной стимуляции* по установленному для его группы протоколу. Стимуляцию осуществляли с помощью аппарата *MagPro X100*

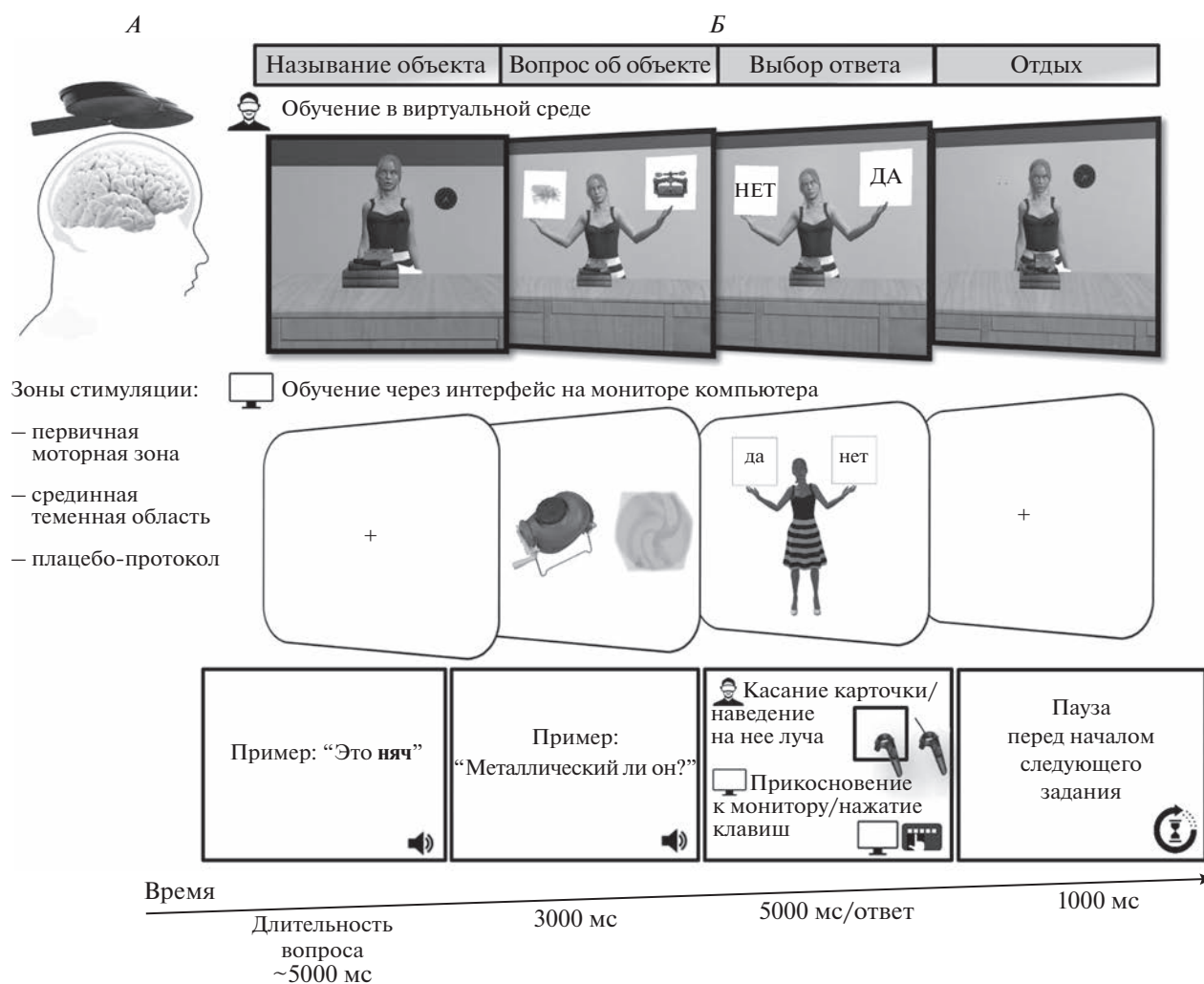


Рис. 1. Экспериментальная процедура исследования.

Этап А включал определение амплитуды моторного порога и типа стимуляции в зависимости от группы. Этап Б включал серии обучающих заданий в виртуальной реальности и за монитором компьютера.

(MagVenture A/S, Дания), снабженного 8-образным индуктором. Во время сеанса испытуемые находились в положении сидя в удобном кресле в экранированной и звукоизолированной комнате (Нейроиконика, Россия) с приглушенным освещением. Сеанс включал стимуляцию 200 тета-вспышками на протяжении 40 с с частотой 5 Гц, при этом каждая вспышка состояла из трех импульсов, повторяемых с частотой 50 Гц (итого 600 импульсов [13]). Протокол рТМС был выбран в связи с достаточной длительностью его эффекта после прекращения стимуляции (до 60 мин), а также успешным опытом применения в моторных обучающих задачах [9, 13]. Амплитуду магнитного поля устанавливали на 80% от предварительно определенного для каждого испытуемого порога моторного ответа, т.е. минимального по интенсивности одиночного магнитного импульса, производимого в области нейрональной ре-

презентации мышцы, сгибающей указательный палец правой руки (*musculus flexor digitorum*), и вызывающего сокращение соответствующей мышцы, т.е. вызванный моторный ответ (ВМО). Для оценки амплитуды ВМО были использованы наконечники электромиографические электроды и усилитель *actiChamp* (BrainProducts GmbH, Германия).

Процедура рТМС в целом была идентичной для трех групп, за исключением места стимуляции: месторасположение катушки стимулятора для групп реальной и плацебо-рТМС первичной моторной коры (М1) уточняли индивидуально при помощи ТМС по отклику большого пальца правой кисти, а для группы реальной стимуляции срединной теменной области ГМ (активный контроль) — на основе локализации отведения *Pz* по системе 10–20%. В ходе эксперимента испытуе-

мые не были осведомлены о типе получаемой ими стимуляции.

Далее испытуемые переходили к выполнению *обучающей серии эксперимента*, направленной на усвоение новых слов. На данном этапе слова предъявляли в контексте семантизирующих предложений совместно с изображениями объектов. Каждый объект демонстрировали испытуемым в течение 3 с, после чего им было необходимо в течение 5 с ответить на вопрос о свойствах этого объекта. Изображения объектов предъявляли испытуемым в паре с нецелевыми визуальными стимулами (семантически ненагруженными масками или ранее известными испытуемым предметами) для обеспечения большей когнитивной нагрузки на испытуемого в рамках комплексного задания, приближенного к естественным условиям языкового научения [27].

В ходе проведения обучающей серии варьировались два фактора: среда обучения и способ двигательного ответа на поставленный вопрос. Половина слов изучалась каждым испытуемым в ВР-интерфейсе, а половина — при работе за монитором компьютера. При этом изображения стимульных объектов и карточки с вариантами ответа (“Да” или “Нет”) на вопросы об их визуальных характеристиках предъявлялись испытуемым виртуальным учителем — девушкой, образ которой при работе за монитором компьютера был двухмерным, а в среде ВР — трехмерным и анимированным.

Для выбора ответа на поставленный вопрос в обеих средах испытуемым было необходимо совершить либо низкоамплитудное, либо высокоамплитудное движение левой рукой. В ВР-условии эти движения были представлены нажатием на курок джойстика при наведении луча и вытягиванием руки для касания таблички с подходящим ответом, соответственно. При работе за монитором компьютера низкоамплитудное движение было представлено нажатием необходимой кнопки на специальном пульте (*RB-740, Cedrus Corp.*, США), а высокоамплитудное — касанием рукой таблички на сенсорном экране компьютера (*PHILIPS 222B9T*, Нидерланды).

Последовательность обучения в двух средах определялась с помощью процедуры контрбалансировки. Экспериментальная парадигма исследования была разработана при использовании программных сред *Presentation 21.1 (Neurobehavioral Systems, США)* и *Unity (Unity Technologies, США)*. Обучающая серия с использованием ВР-технологии была реализована при использовании системы *VIVE Pro Full Kit (HTC Corporation, Тайвань)*, обучение на мониторе компьютера проходило в той же экранированной и звукоизолированной комнате, что и процедура рТМС.

После прохождения процедуры обучения, на завершающем этапе эксперимента, осуществляли *оценку эффективности усвоения новых слов* испытуемыми. Для достижения этой цели использовали задание свободного воспроизведения, при выполнении которого испытуемым было необходимо самостоятельно написать в окне текстового редактора все слова из обучающей сессии, которые им удалось запомнить. Данную проверку осуществляли дважды: 1) непосредственно после прохождения обучающей процедуры и 2) на следующий день.

Для оценки ответов применяли схему нахождения наиболее полного соответствия. Так, испытуемый мог получить 3 балла за слово в случае его полного фонетического соответствия одному из экспериментальных стимулов (например, полностью соответствующими слову “ляч”/[л’ач’] ответами могли быть признаны следующие: “ляч”/[л’ач’], “лач”/[лач’]). В случае неполного фонетического соответствия испытуемый получал за свой ответ 2 балла (например, слова “лям”/[л’ам] и “ляд”/[л’ат] совпадают со словом “ляч”/[л’ач’] частично). Итоговую сумму баллов для каждого испытуемого пересчитывали в процентную долю от максимально возможной, и данный показатель правильности ответов использовали при дальнейшей статистической обработке данных.

Статистический анализ данных выполняли с использованием программного обеспечения *SPSS Statistics v.26.0 (IBM Inc., США)*. В качестве показателя эффективности усвоения новых слов использовали правильность их свободного воспроизведения.

Для оценки воздействия стимуляции на успешность свободного воспроизведения выученных слов был использован факторный дисперсионный анализ (*ANOVA*) с межгрупповым фактором ГРУППЫ СТИМУЛЯЦИИ, а также *ANOVA* смешанного дизайна с повторными измерениями, в котором помимо межгруппового фактора в качестве внутригрупповых были использованы факторы СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА (2 уровня: высокоамплитудное движение руки/низкоамплитудное движение пальцами), СРЕДА ОБУЧЕНИЯ (2 уровня: ВР/монитор компьютера) и ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ (2 уровня: первый/второй день). В случае нахождения значимых эффектов и взаимодействий проводили апостериорное сравнение средних значений воспроизведенных слов с использованием *t*-критерия Стьюдента. Для коррекции уровня статистической значимости на множественные сравнения применяли поправку Бонферрони. В соответствии со стандартной для психолингвистических исследований процедурой статистический анализ был проведен как по испытуемым (далее обозначен индексом 1), так и по словам (индекс 2) [28].

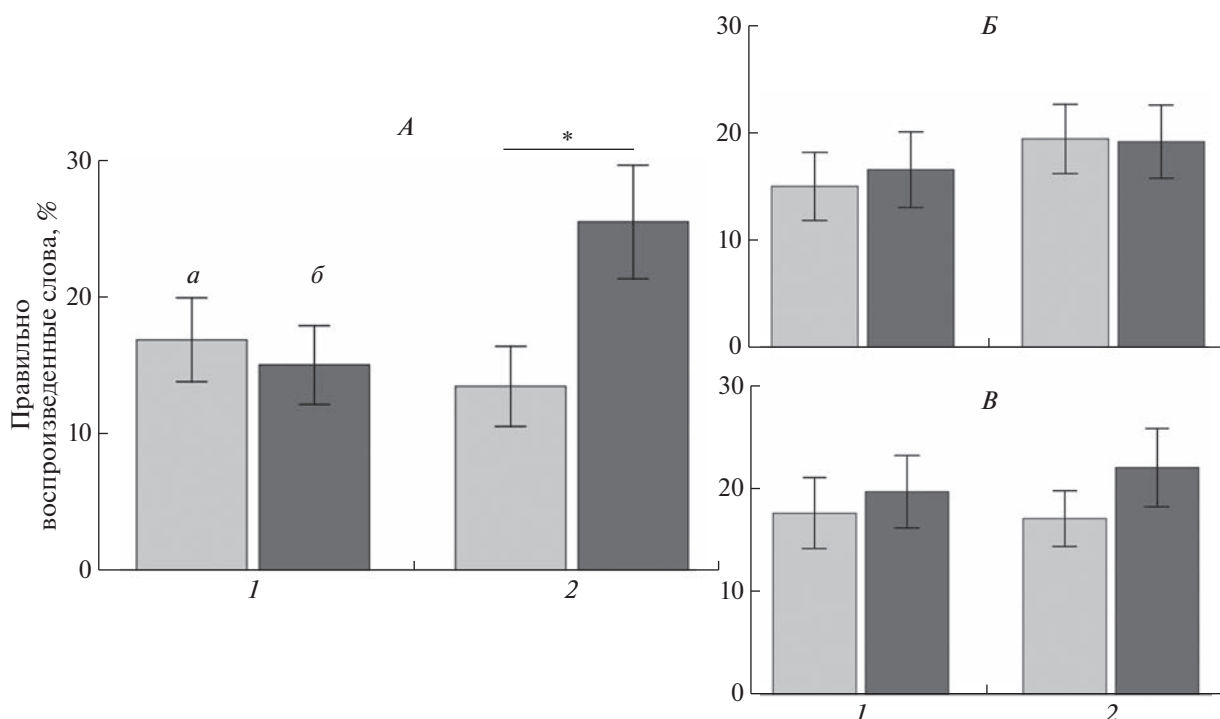


Рис. 2. Влияние факторов ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ и СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА на воспроизведение испытуемыми новых слов при разных типах стимуляции.

А – ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция (рТМС) первичной моторной коры головного мозга (ГМ), *Б* – плацебо-протокол, *В* – рТМС срединной теменной области коры ГМ. На графиках отражен процент правильно воспроизведенных слов и ошибка среднего. * – уровень статистической значимости различий < 0.05 после введения поправки на множественные сравнения. *а* – первый день, *б* – второй день; *1* – высокоамплитудные движения рукой, *2* – низкоамплитудные движения пальцем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Не было обнаружено эффекта ГРУППЫ СТИМУЛЯЦИИ в отношении точности воспроизведения слов ни в первый ($F(1, 93) = 0.262$, $p = 0.770$, $\eta^2 = 0.006$; $F(2, 45) = 0.302$, $p = 0.74$, $\eta^2 = 0.013$), ни во второй день ($F(1, 93) = 0.319$, $p = 0.727$, $\eta^2 = 0.007$; $F(2, 45) = 0.714$, $p = 0.495$, $\eta^2 = 0.031$). Однако дисперсионный анализ с учетом дня воспроизведения позволил выявить близкий к значимому эффект взаимодействия факторов ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ $\times$ СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА $\times$ ГРУППА СТИМУЛЯЦИИ со средней величиной эффекта ($F(1, 93) = 2.639$, $p = 0.077$, $\eta^2 = 0.054$; $F(2, 45) = 3.077$, $p = 0.056$, $\eta^2 = 0.120$). Анализ данного взаимодействия на уровне групп стимуляции позволил обнаружить значимое взаимодействие факторов ДЕНЬ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ $\times$ СПОСОБ МОТОРНОГО ОТВЕТА только в группе рТМС первичной моторной коры ($F(1, 31) = 5.799$, $p = 0.022$, $\eta^2 = 0.158$; $F(2, 15) = 7.451$, $p = 0.016$, $\eta^2 = 0.332$). Апостериорный анализ показал, что слова, выученные при выполнении низкоамплитудных движений руки, во второй день вспоминаются лучше, чем в первый ($t(31) = -2.973$, $p = 0.012$,

$Cohen's d = 0.50$; $t(15) = -3.341$, $p = 0.008$, $Cohen's d = 0.83$). В обеих контрольных группах (т.е. при плацебо-стимуляции и рТМС срединной теменной области) влияние ни одного из факторов не оказалось статистически значимым – как и их взаимодействие (все $p > 0.1$). Результаты представлены на рис. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для изучения роли моторной системы в речевом обучении, сопровождающемся совершением двигательной активности в различных обучающих средах, авторами настоящей статьи был создан сбалансированный экспериментальный дизайн с предъявлением стимулов в виртуальной реальности и на мониторе компьютера. В двух условиях испытуемым в ходе коротких обучающих сеансов было предложено выучить 8 слов при помощи контекстных аудиовизуальных ассоциаций; в процессе обучения испытуемым было необходимо оценить свойства изображенных объектов, выбрав нужный ответ посредством совершения низкоамплитудного движения пальцами или высокоамплитудного движения руки. Эффективность усвоения новых слов оценивалась с

помощью задания свободного воспроизведения, выполняемого испытуемыми непосредственно после обучения и на следующий день. В качестве контрольных условий использовались плацебо стимуляции и реальная стимуляция срединной теменной области ГМ.

Попарные сравнения эффективности запоминания новых слов между тремя группами ТМС в первый и во второй день не показали каких-либо значимых различий. Однако учет таких параметров, как день воспроизведения, способ моторного ответа, а также группа стимуляции позволил обнаружить эффект более успешного усвоения слов, выученных при выполнении низкоамплитудных движений пальцами. Этот эффект проявился в увеличении количества правильных ответов во второй день по сравнению с первым после рТМС первичной моторной коры — при отсутствии аналогичных эффектов в обеих контрольных группах. Данные результаты подтверждают гипотезу о значимой роли моторной системы в усвоении новой речевой информации, хотя и не позволяют конкретизировать характер ее влияния при варьировании условий обучения и способа моторного ответа. При этом важно отметить, что полученные данные согласуются с результатами ранее проведенных исследований в отношении увеличения времени выполнения двигательной задачи в процессе обучения [9] и уменьшения скорости ответа при выполнении речевой задачи, связанной с представлением телесного действия и оценки необходимости вращения руки при его выполнении непосредственно после рТМС первичной моторной коры [16].

Тот факт, что влияние рТМС первичной моторной коры проявилось именно при низкоамплитудных движениях пальцами во время обучающей сессии, может быть связан с тем, что в нашем исследовании осуществлялась стимуляция той области моторной коры ГМ (M1), которая отвечает за дифференцированные нейрональные репрезентации кисти и пальцев руки [29], в то время как представительства дистальных мышц, преимущественно участвующих в высокоамплитудных движениях всей руки, имеют другую (более дорзальную) локализацию с гораздо меньшей дифференциацией и общим объемом задействованного серого вещества [30]. Так, рТМС M1 оказывала наиболее сильное влияние именно на проксимальные низкоамплитудные движения в течение обучающей сессии, что непосредственно сказалось на качестве усвоения слов в рамках использованной нами контекстной интерактивной обучающей задачи.

Альтернативным объяснением данного результата может быть разница в скорости и доступности обратной связи при низкоамплитудных и высокоамплитудных движениях. Первичная мотор-

ная кора тесно связана с принятием решений [31] и считается восприимчивой к обратной связи [24, 32]. Кроме того, она расположена в непосредственной близости от префронтальных ассоциативных зон коры, напрямую вовлеченных в осуществление контроля над данными процессами [33]. Таким образом, нельзя исключать возможность того, что в качестве побочного эффекта применявшегося нами протокола рТМС также произошла стимуляция и этих префронтальных участков. В экспериментальной серии испытуемые в начале каждой пробы принимали решение о том, понадобится ли им выполнять низкоамплитудные или высокоамплитудные движения для ответа на вопрос. Это означает, что сама специфика экспериментального задания способствовала активации системы принятия решений в процессе научения в обоих условиях. Однако обратная связь (в виде исчезновения карточек и начала следующего задания) быстрее поступала при совершении низкоамплитудных движений, что могло создать устойчивые нейронные связи с моторной корой, проявившиеся в более успешном воспроизведении слов во второй день. Данный феномен может быть связан с новизной задачи двигательного ответа с помощью руки в ситуации взаимодействия с виртуальным агентом на мониторе компьютера и ВР-среде и, как следствие, большей вовлеченностью испытуемых в ее выполнение. Данная гипотеза находит подтверждение в исследовании *R.C.A. Barrett et al.* [34], где участники значительно медленнее манипулировали геометрическими 3D-фигурами в ВР-пространстве и на мониторе компьютера с помощью контроллера и джойстика, чем 2D-фигурами с помощью того же джойстика на мониторе компьютера. При этом анализ глазодвигательной активности показал более длительную продолжительность фиксаций в первых двух условиях [34].

Лучшее воспроизведение новых слов во второй день, чем в первый, вероятно, связано с эффектом консолидации знаний в ходе ночного сна [35]. Задания эксперимента представляли собой эксплицитное речевое научение [36], характеризующееся постепенным закреплением ассоциаций, присущим декларативной памяти [37]. Возможно, именно этим объясняется тот факт, что наиболее заметные эффекты научения проявились только на второй день.

Отдельного внимания заслуживает отсутствие значимого влияния среды обучения на усвоение речевой информации, в том числе при учете группы стимуляции, свидетельствующее об одинаково успешном обучении в обоих условиях. Эти данные противоречат результатам, ранее полученным другими исследовательскими группами и описывающим значимые различия при использовании разных сред обучения [19, 20], однако соответствуют результатам, которые мы получили в

ходе проведения пилотажного этапа исследования [25]. Вероятно, это объясняется более высокой, чем в предыдущих исследованиях, сбалансированностью двух условий в нашем эксперименте по ряду параметров: идентичности обучающих заданий, характеру двигательной активности и наличию виртуального агента. В пользу данной гипотезы говорят результаты *K. Papin* и *R. Kaplan-Rakowski* [38], показавшие большую эффективность речевого научения на мониторе компьютера с возможностью свободной навигации и звуковым сопровождением (ВР с низким уровнем погружения) — по сравнению с аналогичным нашему исследованию условием ВР с высоким уровнем погружения (ВР-очками). Авторы отмечают, что в условиях созданной ими парадигмы различия в уровнях интерактивности и погружения в двух обучающих средах были нивелированы. Другим объяснением может быть эффект новизны ВР-пространства, способствующий отвлечению внимания и, как следствие, снижению эффективности ВР до уровня обучения с использованием монитора компьютера [23]. Согласно проведенному нами опросу, опыт использования ВР среди участвовавших в эксперименте испытуемых был минимален. Однако на данном этапе эти предположения носят скорее предварительный характер, и их еще предстоит проверить в будущих исследованиях.

ВЫВОДЫ

1. В исследовании не было обнаружено достоверного влияния среды обучения (виртуальной реальности и монитора компьютера) на успешность свободного воспроизведения новых слов, усвоенных испытуемыми, прошедшими процедуру рТМС с использованием различных протоколов. Можно предположить, что при выполнении сложных лингвистических заданий двигательная и когнитивная системы обработки информации одинаково успешно функционируют в разных средах обучения при условии сбалансированности прочих параметров.

2. Продemonстрировано возможное участие первичной моторной коры в процессах речевого научения, проявившееся во влиянии рТМС данной коры ГМ на количество правильных ответов в задаче свободного воспроизведения новых слов. Интересно, что данный эффект проявился в отношении существительных, семантика которых не была связана с совершением движений, в то время как предыдущие исследования, в первую очередь, подчеркивали роль моторной коры в обработке глаголов, обозначающих телесные действия.

3. рТМС первичной моторной коры способствовала воспроизведению большего количества слов во второй день в сравнении с первым, что,

возможно, указывает на влияние данного типа стимуляции на процессы консолидации памяти.

4. Эффект рТМС проявился только для низкоамплитудных движений, совершаемых пальцами, что может быть связано как с высоким уровнем дифференциации и общим размером их репрезентации в моторной коре ГМ, так и с вовлечением данной зоны (и/или смежных зон) в механизмы принятия решений и получения обратной связи.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Этическим комитетом Санкт-Петербургского психологического общества (Санкт-Петербург) (протокол № 9 от 07.10.2021).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование выполнено за счет гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук № 075-15-2021-355 (проект МК-2021.2021.2).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. Е.И. Перикова — разработка дизайна исследования, сбор и анализ полученных данных, написание текста рукописи; Е.Н. Блинова — сбор и анализ данных, координация исследования, оформление рукописи; Е.А. Андрущенко — сбор и анализ данных, координация исследования, оформление рукописи; Е.Д. Благовещенский — участие в планировании исследования, редактирование статьи; О.В. Щербакова — участие в разработке стимульного материала, редактирование статьи; Ю.Ю. Штыров — идея, разработка дизайна и координация исследования, разработка концепции статьи, редактирование статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tulving E.* Precise of Episodic Memory // *Behav. Brain Sci.* 1984. V. 7. № 2. P. 223.
2. *Barsalou L.W.* Grounded cognition // *Annu. Rev. Psychol.* 2008. V. 59. P. 617.
3. *Pulvermüller F.* Brain mechanisms linking language and action // *Nat. Rev. Neurosci.* 2005. V. 6. № 7. P. 576.
4. *Matheson H.E., Barsalou L.W.* Embodiment and Grounding in Cognitive Neuroscience / *Stevens' Handbook of Experimental Psychology and Cognitive*

- Neuroscience (4th ed.) // Eds. Wixted J.T., Phelps E.A., Davachi L. Wiley, 2018. P. 1.
5. Ведысова О.А., Моренова К.А., Павленко С.И. Электроэнцефалографические и вегетативные корреляты воображаемых и реальных движений ног у правшей и левшей // Физиология человека. 2022. Т. 48. № 5. С. 38.
Vedyasova O.A., Morenova K.A., Pavlenko S.I. Electroencephalographic and autonomic correlates of imaginary and real movements of legs in right-handers and left-handers // Human Physiology. 2022. V. 48. № 5. P. 516.
 6. Buccino G., Riggio L., Melli G. et al. Listening to action-related sentences modulates the activity of the motor system: A combined TMS and behavioral study // Cogn. Brain Res. 2005. V. 24. № 3. P. 355.
 7. Taylor L.J., Zwaan R.A. Action in cognition: The case of language // Lang. Cogn. 2009. V. 1. № 1. P. 45.
 8. Postle N., McMahon K.L., Ashton R. et al. Action word meaning representations in cytoarchitecturally defined primary and premotor cortices // Neuroimage. 2008. V. 43. № 3. P. 634.
 9. Clark G.M., Barham M.P., Ware A.T. et al. Dissociable implicit sequence learning mechanisms revealed by continuous theta-burst stimulation // Behav. Neurosci. 2019. V. 133. № 4. P. 341.
 10. Vukovic N., Feurra M., Shpektor A. et al. Primary motor cortex functionally contributes to language comprehension: An online rTMS study // Neuropsychologia. 2017. V. 96. P. 222.
 11. Нарышкин А.Г., Галанин И.В., Егоров А.Ю. Управляемая нейропластичность // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 2. С. 112.
Naryshkin A.G., Galanin I.V., Egorov A.Yu. Controlled Neuroplasticity // Human Physiology. 2020. V. 46. № 2. P. 216.
 12. Jannati A., Oberman L.M., Rotenberg A., Pascual-Leone A. Assessing the mechanisms of brain plasticity by transcranial magnetic stimulation // Neuropsychopharmacology. 2023. V. 48. № 1. P. 191.
 13. Huang Y.Z., Edwards M.J., Rounis E. et al. Theta burst stimulation of the human motor cortex // Neuron. 2005. V. 45. № 2. P. 201.
 14. Repetto C., Colombo B., Cipresso P., Riva G. The effects of rTMS over the primary motor cortex: The link between action and language // Neuropsychologia. 2013. V. 51. № 1. P. 8.
 15. Murteira A., Sowman P.F., Nickels L. Does TMS disruption of the left primary motor cortex affect verb retrieval following exposure to pantomimed gestures? // Front. Neurosci. 2018. V. 12. P. 920.
 16. Tomasino B., Fink G.R., Sparing R. et al. Action verbs and the primary motor cortex: A comparative TMS study of silent reading, frequency judgments, and motor imagery // Neuropsychologia. 2008. V. 46. № 7. P. 1915.
 17. Witt J.K., Kemmerer D., Linkenauger S.A., Culham J. A functional role for motor simulation in identifying tools // Psychol. Sci. 2010. V. 21. № 9. P. 1215.
 18. Xie Y., Chen Y., Ryder L.H. Effects of using mobile-based virtual reality on Chinese L2 students' oral proficiency // Comput. Assist. Lang. Learn. 2021. V. 34. № 3. P. 225.
 19. Ковалев А.И., Роголева Ю.А., Егоров С.Ю. Сравнение эффективности применения технологий виртуальной реальности с традиционными образовательными средствами // Вестник Московского университета. Сер. 14: Психология. 2019. № 4. С. 44.
Kovalev A.I., Rogoleva Yu.A., Egorov S.Yu. A Comparison of the effectiveness of learning using virtual reality and traditional educational methods // Moscow University Psychology Bulletin. 2019. № 4. P. 44.
 20. Legault J., Zhao J., Chi Y.A. et al. Immersive Virtual Reality as an Effective Tool for Second Language Vocabulary Learning // Languages. 2019. V. 4. № 1. P. 13.
 21. Repetto C., Di Natale A.F., Villani D. et al. The use of immersive 360° videos for foreign language learning: a study on usage and efficacy among high-school students // Interact. Learn. Envir. 2021.
<https://doi.org/10.1080/10494820.2020.1863234>
 22. Alfadil M. Effectiveness of virtual reality game in foreign language vocabulary acquisition // Computers & Education. 2020. V. 153. P. 103893.
 23. Vázquez C., Xia L., Aikawa T., Maes P. Words in motion: Kinesthetic language learning in virtual reality / 2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies. 09-13 July, 2018. P. 272.
 24. Vukovic N., Hansen B., Lund T.E. et al. Rapid microstructural plasticity in the cortical semantic network following a short language learning session // PLoS Biol. 2021. V. 19. № 6. P. e3001290.
 25. Oldfield R.C. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory // Neuropsychologia. 1971. V. 9. № 1. P. 97.
 26. Ясюкова Л.А. Тест Амтхауэра. Диагностика структуры интеллекта. СПб.: Питер, 2007. 80 с.
 27. Перикова Е.И., Блинова Е.Н., Андрищенко Е.А. Влияние обучающей среды на имплицитное и эксплицитное научение новым словам: результаты пилотажного исследования // Сибирский психологический журн. 2022. № 85. С. 174.
Perikova E.I., Blinova E.N., Andriushchenko E.A. The Influence of the Learning Environment on Fast Mapping and Explicit Encoding of New Vocabulary: Results of a Pilot Study // Siber. J. Psychol. 2022. № 85. P. 174.
 28. Clark H.H. The language-as-fixed-effect fallacy: A critique of language statistics in psychological research // J. Verbal Learning Verbal Behav. 1973. V. 12. P. 335.
 29. Penfield W., Boldrey E. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation // Brain J. 1937. V. 60. № 4. P. 389.
 30. Yousry T.A., Schmid U.D., Alkadhi H. et al. Localization of the motor hand area to a knob on the precentral gyrus. A new landmark // Brain. 1997. V. 120. Pt. 1. P. 141.
 31. Cisek P., Pastor-Bernier A. On the challenges and mechanisms of embodied decisions // Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci. 2014. V. 369. № 1655. P. 20130479.
 32. Derosiere G., Zénon A., Alamia A., Duque J. Primary motor cortex contributes to the implementation of implicit value-based rules during motor decisions // Neuroimage. 2017. V. 146. P. 1115.

33. *Bhattacharjee S., Kashyap R., Abualait T. et al.* The role of primary motor cortex: more than movement execution // *J. Motor Behav.* 2021. V. 53. № 2. P. 258.
34. *Barrett R.C.A., Poe R., O'Camb J.W. et al.* Comparing virtual reality, desktop-based 3D, and 2D versions of a category learning experiment // *PLoS One.* 2022. V. 17. № 10. P. e0275119.
35. *Dumay N., Gaskell M.G.* Overnight lexical consolidation revealed by speech segmentation // *Cognition.* 2012. V. 123. № 1. P. 119.
36. *Shtyrov Y., Kirsanov A., Shcherbakova O.* Explicitly Slow, Implicitly Fast, or the Other Way Around? *Brain Mechanisms for Word Acquisition* // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 116.
37. *Васильева М.Ю., Князева В.М., Александров А.А., Штыров Ю.Ю.* Сверхбыстрое усвоение новой лексики: нейрофизиологические корреляты механизма "fast mapping" у детей и взрослых / От слова — к репрезентации. Нейрокогнитивные основы вербального научения. СПб.: Скифия-принт, 2022. С. 144.
38. *Papin K., Kaplan—Rakowski R.* A study of vocabulary learning using annotated 360° pictures // *Comput. Assist. Lang. Learn.* 2022. <https://doi.org/10.1080/09588221.2022.2068613>

Continuous Theta-Burst Stimulation of the Primary Motor Cortex Induces Specific Influence on Novel Vocabulary Acquisition in Different Learning Environments

E. I. Perikova^{a, *}, E. N. Blinova^a, E. A. Andriushchenko^a, E. D. Blagovechtchenski^{a, b},
O. V. Shcherbakova^a, Y. Y. Shtyrov^c

^a*Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

^b*Pavlov Institute of Physiology, RAS, St. Petersburg, Russia*

^c*Aarhus University, Aarhus, Denmark*

*E-mail: e.perikova@spbu.ru

The primary motor cortex takes part in various stages of language learning accompanied by human motor activity. However, previous studies of causal relationships between the activation of primary motor cortex and efficiency of language tasks reveal contradictory results, likely due to diverging learning environments and specific movement patterns required by different experimental designs. The goal of this research was to comprehensively investigate the effect of continuous theta-burst magnetic stimulation (cTBS) of the primary motor cortex on the acquisition of new words while modulating the learning environment and the motor response during the learning process. Following cTBS of the primary motor cortex or control conditions (sham and active control cTBS), the subjects ($n = 96$) completed a novel word learning task, which involved associating visually presented objects with spoken word forms using a virtual reality (VR) or conventional computer monitor environment. In each environment, the subjects were exposed to eight novel words embedded into questions about visual stimulus properties in order to prompt novel associations. Responses to these questions could be performed either by distal or by proximal hand movements. The outcome of the word acquisition was measured using a free recall task immediately after the training and on the next day. The results showed significant differences in the success of recalling new words immediately after the learning session and on the next day only in those subjects who received cTBS of the primary motor cortex; furthermore, this effect was specific to proximal movements in both learning environments. The results suggest that the motor cortex is directly involved in acquiring novel vocabulary during active interaction with the learning material.

Keywords: continuous theta-burst stimulation, word learning, language acquisition, language, brain, motor cortex, embodiment cognition, virtual reality.

УДК 612.821, 159.95

ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ РЕЧИ И ЯЗЫКА И ИЗУЧЕНИЕ РАЗЛИЧИЙ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ИХ НЕЙРОСЕТЕЙ

© 2023 г. И. Г. Маланчук¹, *, В. А. Орлов¹, С. И. Карташов¹, Д. Г. Малахов¹

¹ФГБУ “Национальный исследовательский центр
“Курчатовский институт”, Москва, Россия

*E-mail: cora1@inbox.ru

Поступила в редакцию 22.11.2022 г.

После доработки 20.01.2023 г.

Принята к публикации 31.01.2023 г.

В данной статье рассматривается проблема дифференциации систем речи и языка человека. На основе современных представлений в области психологии речи, речеведения, интонологии формируется понятие о единицах (формах) речи как неязыковых феноменах, имеющих в человеческой коммуникации функцию трансляции иллокутивных смыслов, т.е., прежде всего, коммуникативных и социальных целей, а также качества социальных отношений. В подтверждение концепции “Речь vs. Язык” представлены результаты исследования функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), проведенного на выборке взрослых. Установлены отличия нейросетей головного мозга человека, обеспечивающих восприятие форм естественной устной речи – собственно речевого и минимального по структуре речезыкового сигналов, имеющих одно и то же прагматическое содержание. В связи с полученными данными обсуждаются перспективы исследования, связанные с анализом функциональной связности в структурах двух типов сетей, последовательным усложнением речевого и языкового компонентов высказывания и предъявлением мультимодальных естественных речекommunikативных стимулов. Анализ различий процессов и нейросетей речи и языка значим для разработки технологий синтеза речи, диагностического и коммуникативного искусственного интеллекта.

Ключевые слова: речь, язык, дифференциация процессов речи и языка, фМРТ, восприятие устной речи, нейросети речи и языка, взрослые.

DOI: 10.31857/S0131164623700224, EDN: GEK MAD

Процессы восприятия и продуцирования речи в их феноменологическом, психо- и нейрофизиологическом аспектах являются самыми сложными, высокоспециализированными и, согласно современным нейрофизиологическим представлениям, распределенными системами процессов как в целом, так и в их составляющих, соотнесенных с отдельными функциями [1–8]. Помимо необходимости более точного установления областей головного мозга человека, эффективных нейронных связей (нейросетей) и особенностей латерализации при решении человеком различных речевых задач [3, 9–11], для построения программ экспериментальных нейрофизиологических исследований речи и объяснения выявляемых систем активаций, необходимо обращение к новейшему знанию, вырабатываемому такими смежными и базовыми для нейрофизиологических исследований речи научными дисциплинами как речеведение, интонология, дискурсивная лингвистика и дискурсивная психология, которые, в свою очередь, напрямую связаны с социальной психологией,

включая теорию социального познания. В настоящей статье рассматривается возможность современного речеведения [12–16], интонологии [17–22] и разработанной нами общепсихологической теории речи [23] в решении ключевого вопроса – дифференциации процессов речи и языка, а также представлены результаты исследования функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), направленного на установление различий нейросетей при восприятии неязыковой речи и интегративных речезыковых конструкций.

История изучения речи, как известно, связана с многочисленными попытками дифференцировать речь и язык. Приближение к решению этой задачи произошло в русской риторике первой половины XIX в. [24], однако феномен “единица речи” в его неязыковом содержании не был определен. В настоящее время, несмотря на попытки преодолеть лингвоцентричный подход к речи, особенно в связи со смещением интереса к условиям и правилам коммуникации в теории речевых актов (ТРА) (ключевые тексты Дж. Остина,

Дж. Серля и другие, см. в [25]) и теории речевых жанров (ТРЖ) [12–16, 26–28], в подавляющем большинстве теоретических описаний и исследований речи — психологических, лингвистических (от фонетических до синтаксических) — речь по-прежнему понимается как “функционирующий язык”, в феноменологическом смысле не абстрагируясь от языкового содержания [29–32]. Эта установка продолжает поддерживаться и в современной учебной нейрофизиологической литературе и нейрофизиологических исследованиях речи [33–37], а просодические, в том числе интонационные средства и структуры, не рассматриваются как дифференцированные по своей принадлежности к речи либо языку, что, безусловно, значимо для разработки стимульного материала и интерпретации данных. Интонация категоризируется в нейрофизиологии речи как “эмоциональная” и “лингвистическая” (куда включаются и те виды интонации и просодические средства, которые обеспечивают трансляцию коммуникативных намерений) [11, 38].

Между тем, к концу XX — началу XXI в. разработано немало оснований для пересмотра представлений о системах речи и языка, возможности дифференцировать их и как коммуникативные, и как интрапсихические феномены, исследовать нейрональные процессы восприятия и продуцирования собственно речи и языковых конструкций, а также заново обратиться к анализу процессов, обеспечивающих интеграцию речи и языка.

Так, эволюционно-генетический подход к человеческой речи позволяет обобщить вокальную сигнализацию животных и интонационную/просодическую составляющую человеческой речи как функцию, реализующую социальную связь в самой эффективной (вокальной) форме, — при констатации факта выработки людьми специфических вокальных систем с естественным для антропосоциогенеза “приращением” социального, прагматического содержания речи в собственно человеческих культурах. Однако сегодня поиск “преемственности” ведется сквозь призму человеческого языка по линии “вокальные системы животных — естественный человеческий язык” [39–45], между тем, две линии требуют специфического рассмотрения и особых научных аппаратов: 1) “вокальные системы животных — вокальная функция/система человека, т.е. собственно речь, в ее взаимосвязи с мышлением, обеспечившим ее развитие от антропологически ранних к современным системам речи и обеспечивающим онтогенетическое развитие речи от нативных к культурным формам” и 2) “вокальные возможности человека (для развития фонетического строя языка) во взаимосвязи с мышлением, обеспечившим возникновение и развитие системы естественного человеческого языка”. Это отвечает и нейрофизиологическим исследо-

ваниям последних лет, которые при анализе слухового восприятия речезыковых феноменов (т.е. фактически феноменов интегративного порядка) выделяют как минимум два типа нейрональных процессов — *что* и *как* [46].

Ранний постнатальный речевой онтогенез свидетельствует о гетерохронном развитии функций речи и языка, и пока язык в течение первого года жизни осваивается латентно, но с совершенно определенной динамикой освоения фонетико-фонематического, лексического и синтаксического строя родного языка [47–53], параллельно языковому развитию и ранее происходит освоение и активное использование собственно речевых форм коммуникации, а именно: не ассоциированных с языком диалогических структур вокальной коммуникации в диадах “мать—младенец” [54, 55] и вокально-интонационных структур высказываний, имеющих прагматическое содержание [56].

Примерами собственно речевых конструкций (в современной онтолингвистике и биологии используется термин “вокально-речевых” [47]) являются человеческие вокализации — не только нативные младенческие, но и вполне распространенные в коммуникативных культурах взрослых популяций/субкультур и используемые как конвенциональные коммуникативные средства. У довербальных младенцев это вокализации требования, обиды, указания на объект, запрос имени объекта и другие, у взрослых — вокализации недовольства, удовольствия, удивления, радости и множество других [57], которые представлены в речи наряду с вербальными высказываниями того же интенционального (мотивационно-целевого) содержания. И здесь необходима фокусировка на термине “речевой жанр”, который оказался эвристичным и продуктивным для собственно речевой квалификации социально-коммуникативного содержания любого высказывания — от 0-речи и вокализаций до интегративных речезыковых феноменов — сложных предложений, целостных текстов и дискурсивных событий.

В 1980-х — начале 1990-х гг. интерес к лингвистической прагматике, где проблема генерации грамматической формы предложения решалась с учетом коммуникативных условий [25], и одновременно к феномену “речевой жанр” [12], привел на российской почве к разработке ТРЖ (vs. ТРА), построению типологий речевых жанров [13, 15, 23], развитию представлений об условиях реализации категории “речевой жанр” в процессе речепроизводства [27, 28], кросс-культурным [19, 58, 59] и онтосоциогенетическим [59, 60] исследованиям речевых жанров. При всей важности проведенных с тех пор исследований не было получено ответа на вопрос о том, что является материальным носителем жанровой формы выска-

званий. С точки зрения лингвистического речеведения, которое попыталось было преодолеть лингвоцентрический подход к высказыванию и сформулировало на этом пути много интересных идей, это — грамматическая форма вербального высказывания, чему во многом способствовал и основополагающий для ТРЖ текст М.М. Бахтина [12] (в сравнении с А.М. Пешковским [61]). Однако доказательных аналитических, а тем более статистических исследований соответствия лексико-грамматического и синтаксического строя предложений/высказываний их жанрово-коммуникативному содержанию практически нет, а если бы это соответствие было прямым, полным и однозначным, лингвистике пришлось бы отказаться от крайне важной установки на существование в высказывании смыслов, не выраженных и/или принципиально не выражаемых с помощью языка, утратился бы и смысл использования интонационных (и в широком смысле просодических) средств, обеспечивающих инвариантное и вариативное [62] жанрово-прагматическое содержание форм речи.

В настоящее время исследование речи как системы вокальных конструкций, упорядоченных определенным образом в различных речевых культурах, методологически обеспечивают:

1) комбинаторная модель интонации С.В. Кодзасова, атрибуция им интонации собственно речевой системе, понимание того, что существует несколько систем просодических средств, реализующихся в высказывании с различными целями и на разных его уровнях — речекоммуникативном и языковом [17];

2) исследования в области интонологии последней трети XX — начала XXI в., направленные на установление закономерностей интонационного выражения прагматических смыслов. Результатами таких работ стали типология интонационных конструкций в связи с основными типами высказываний [17], установление интонационных особенностей перформативов и некоторых других жанров обыденной речи [18], установление соответствия интонационных единиц иллокутивным смыслам в русскоязычной речи и других этнических речекоммуникативных культурах [19], а иллокутивные смыслы, как известно, конституируют речеганровые формы (в зарубежной прагмалингвистике — речевые акты). В новейших работах характеризуются особенности просодии в русской речевой культуре и просодические стратегии интеграции речевых актов в дискурсивные структуры [20–22]. Важно отметить, что в существующих единичных нейрофизиологических исследованиях, апеллирующих к таким речекоммуникативным феноменам как *приказ*, *просьба* и некоторым другим [11, 37], в качестве стимулов были использованы вербальные высказывания, т.е. не диффе-

ренцированные по речи/языку стимулы (стимулы такого рода используются во множестве работ, в том числе и в самых последних, например [63–66]);

3) постулат о знаковой природе собственно речи (в отличие от знаков языка) [23] — существовании специфической системы вокальных конструкций, по сравнению с языком приоритетно обеспечивающей трансляцию социально-коммуникативных смыслов высказывания; см. также [15], где феномен речевого жанра связывается с понятием знаковой формализации жанрового типа;

4) общепсихологическая концепция речи [23], которая акцентирует до- и внеязыковой характер системы речи (*vs.* язык); соотносит лингвистический термин “речевой жанр” с психологическим термином “форма речи”, в отношении последнего имея в виду как типическую, так и конкретно-ситуативную интонационно-просодическую реализацию высказывания и его жанровых сегментов; развивает представления о структуре психического содержания форм речи и о психических операндах процессов речи, которыми являются многопараметрические, мультисенсорные образы устойчивых в социально-коммуникативной культуре звукокомплексов, имеющих собственную, отличную от используемых языковых средств, семантику социальных отношений и социального воздействия.

Это знание, которое, будучи представленным в необходимой и достаточной степени в нейрофизиологических исследованиях речи, могло бы составить обновленную концептуальную основу нейрофизиологических исследований речи, разработки стимульного материала и интерпретации их результатов. Однако лишь отдельные исследователи нейрофизиологической основы просодии в атональных языках, включая русский язык, приближались к тому, чтобы в используемых методиках дифференцировать речевые и языковые стимулы [66–70] (см. также [71], где интонационная составляющая высказывания вычленяется и предсказывается в задачах разработки технологий синтеза речи).

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 15 испытуемых — 8 женщин, 7 мужчин (средний возраст — 22.4 года) с нормальным слухом и зрением, с их слов — без неврологических нарушений (без обращения к неврологу в течение последних двух лет), правши. Все испытуемые — студенты вузов (уровень бакалавриата либо магистратуры), носители русской речевой городской культуры и русского языка как родного.

С целью подтверждения представлений о принципиальном различии систем и процессов речи и языка было проведено нейрофизиологиче-

ское исследование. В данной статье представлена лишь часть результатов проведенного фМРТ-исследования, в котором сфокусировались на процессах восприятия естественных для взрослой коммуникации устных речевых и речезыковых стимулов, имеющих одинаковое интонационное содержание.

В ходе фМРТ-эксперимента испытуемым предъявляли четыре стимула. Стимул *S1* представляет собой вопросительную вокализацию с типичным для вопроса повышением тона в границах единственного гласноподобного звука, который условно обозначен как редуцированный [ъ]: *Ъ?* Стимулы *S2–S4* – вопросительные вербальные высказывания: *S2* – холофраза (однословное высказывание *Да?*, где слово является односложным), *S3* – простое предложение минимальной языковой структуры *NIVf* (существительное в именительном падеже + финитный глагол: *Он знал?*), *S4* – простое предложение, распространенное объектным актантом (*Obj*) в винительном падеже, структуры *NIVfN4*: *Он знал это?* При выборе простых предложений соотносились с материалами докторской диссертации [67], по сравнению с которой в задачах нашего исследования расширили стимульную парадигму. Соответственно числу использованных стимулов в фМРТ-эксперименте был использован рандомизированный блочный план по типу латинский квадрат 4×4 . Стимулы предъявляли в рандомизированном порядке, по 8 предъявлений каждого стимула в каждом блоке с интервалом 1 с между одинаковыми стимулами в блоке и интервалом в 15 с между сериями стимулов одного типа в блоке, а также между блоками. Все стимулы являются естественными речекommunikативными единицами, используемыми во взрослой обиходной коммуникативной культуре; для распознавания их значений и смыслов не требовалось предварительного обучения испытуемых. Стимулы были записаны в шумоизолированной студии профессиональным педагогом по речи, женским голосом, в высоком регистре. На рис. 1–4 представлены тонограммы каждого стимула, выполненные и проанализированные с помощью компьютерной программы *Speech Analyzer*. Каждый стимул (*S1, S2, S3, S4*) был произнесен как одно фонетическое слово, паузирования между словами в вербальных высказываниях *S3* и *S4* нет. Значимая для реализации жанра вопроса динамика ЧОТ характеризуется последовательным естественным повышением тона в диапазоне от 220–240 до 370–390 Гц, временной диапазон повышательной интонации составил для стимулов *S1* и *S2* около 100 мс (рис. 1, 2), для стимулов *S3* и *S4* в силу сонорного окружения ударного гласного (зна'л) и различий в языковом оформлении финалов предложений – 158 и 142 мс, соответственно (рис. 3, 4). Была проведена нормализация стимулов *S1–S4* по громкости. Эмоциональная составляющая стимулов была минимизиро-

вана в процессе их отбора из серии созданных нами фонетических проб и, согласно экспертным оценкам, собранным от 5 сотрудников лаборатории, и оценкам испытуемых в постэкспериментальном опросе, они не содержат выраженного позитивного, либо негативного эмоционального компонента, распознаются как “нейтральные”.

Стимулы предъявляли через амагнитные головные телефоны с функцией шумоподавления на звуковом уровне 80 дБ, бинаурально. Во время записи испытуемые должны были сохранять спокойное расслабленное состояние и смотреть на экран монитора, где с целью организации визуального внимания испытуемого предъявляли фиксировочный крест.

Сканирование проводили на магнитно-резонансном томографе *Siemens Magnetom Verio 3T* (Германия) с 32-канальной головной МР-катушкой. Испытуемого располагали в МРТ-камере в положении лежа, голову закрепляли с помощью уплотняющих модулей. Для каждого испытуемого были записаны анатомические данные с высоким разрешением на основе *T1*-взвешенной *3D* последовательности (*repetition time (TR) = 2530* мс, *echo time (TE) = 3.31* мс, 176 срезов, размер воксела – $1 \times 1 \times 1$ мм). Запись функциональных данных осуществляли на основе мультисрезовой эхо-планарной последовательности *EPI*: *TR = 1110* мс, *TE = 24* мс, 51 срез, размер воксела – $2 \times 2 \times 2$ мм, угол отклонения вектора намагниченности (*flip angle*) 90° . От каждого испытуемого в эксперименте было получено по 32 записи активации мозга на каждый стимул.

Предобработку данных МРТ проводили на основе свободно распространяемого программного пакета *SPM12* и разработанных одним из авторов настоящей статьи (В.А. Орлов) терминальных скриптов системы *MacOS*. Структурные и функциональные данные были приведены к центру в передней комиссуре вручную. Проводили расчет и коррекцию артефактов движения. С целью удаления артефактов магнитной восприимчивости, на основе записанных во время исследования карт неоднородности магнитного поля выполняли коррекции функциональных данных. Структурные и функциональные МРТ объемы были нормализованы на шаблонные изображения в *MNI (Montreal Neurological Institute)* пространстве. Использование мультисрезовых последовательностей для регистрации фМРТ приводит к появлению физиологических и аппаратных вкладов в шум. Такие вклады приводят к некорректной статистической оценке активации нейронных сетей. Для их детекции и подавления использовали ме-

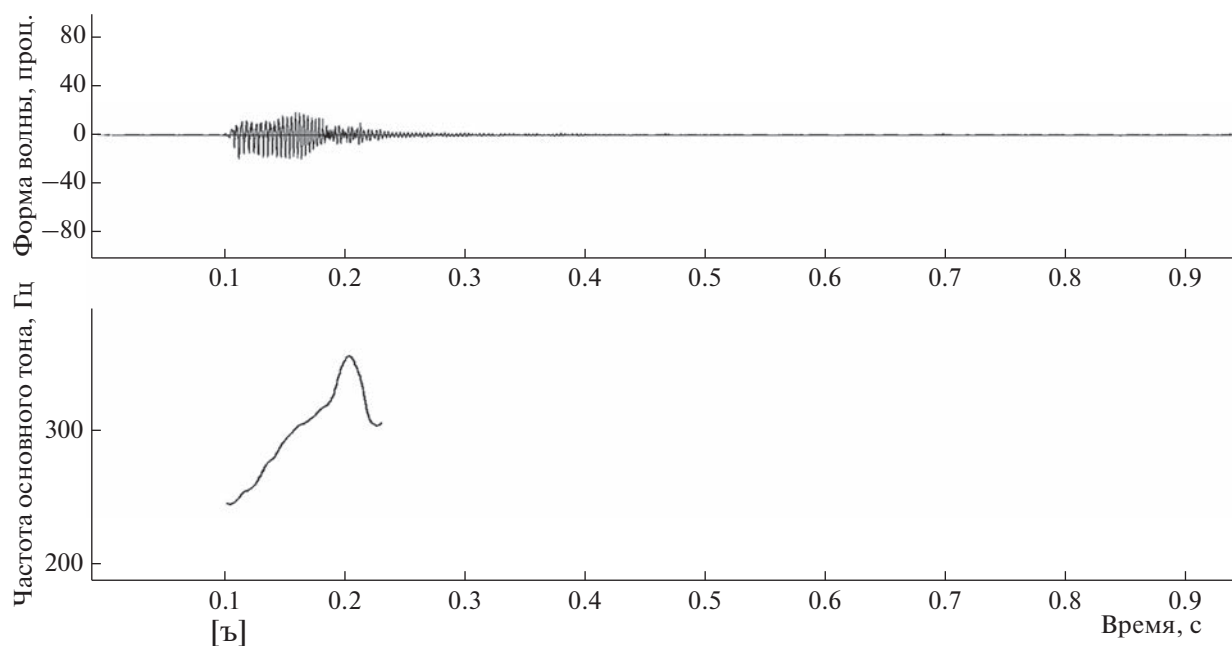


Рис. 1. Тониграмма стимула *S1* – вопросительной вокализации (гласноподобный звук, условно обозначенный как [ʔ]).

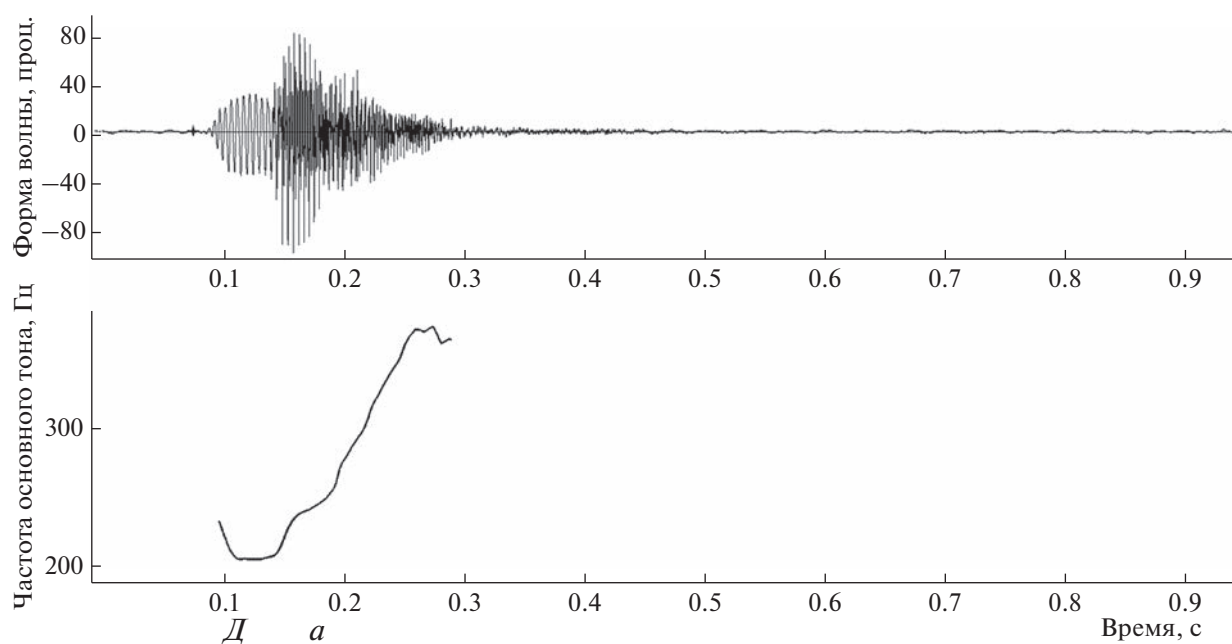


Рис. 2. Тониграмма стимула *S2* – вопросительной холофразы *Да?*

тод независимых компонент (МНК). На последнем этапе предобработки данных с целью удаления случайных выбросов к функциональным данным был применен гауссовский фильтр с ядром $6 \times 6 \times 6$ мм. Для получения результирующих статистических карт использовали классическую обобщенную линейную модель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для подтверждения концепции, определяющей речь и язык как две различные коммуникативные (знаковые) системы, при реализации которых в процессах восприятия и продуцирования задействованы особые психо- и нейрофизиологиче-

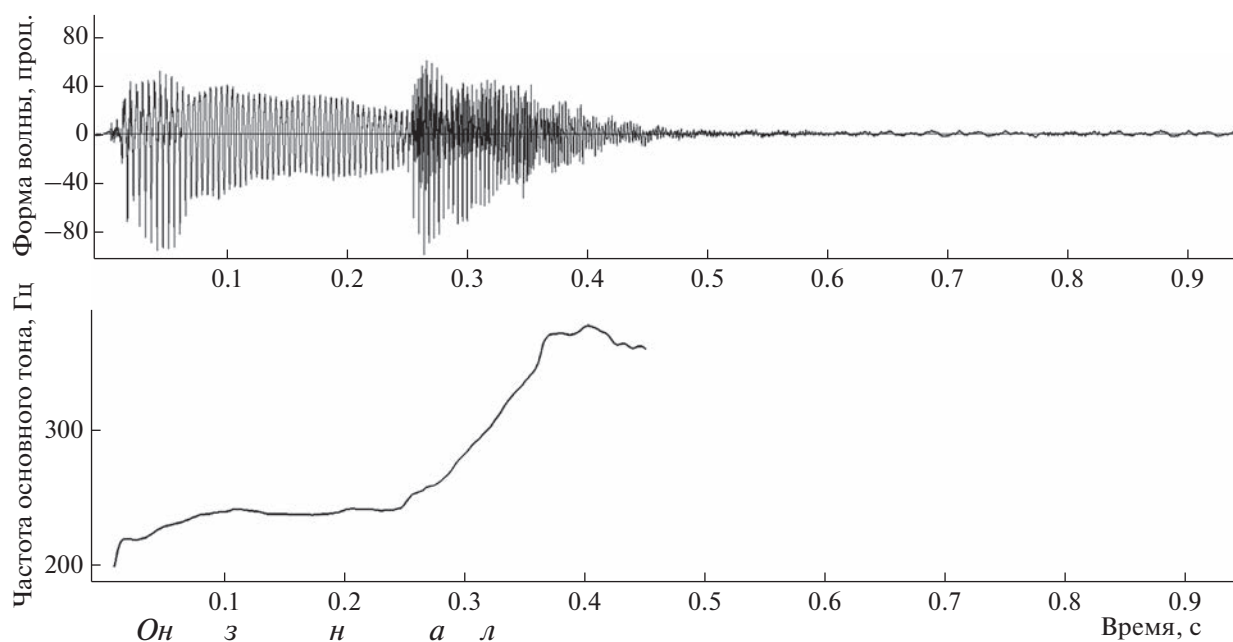


Рис. 3. Тонограмма стимула *S3* – вопросительного предложения *Он знал?*

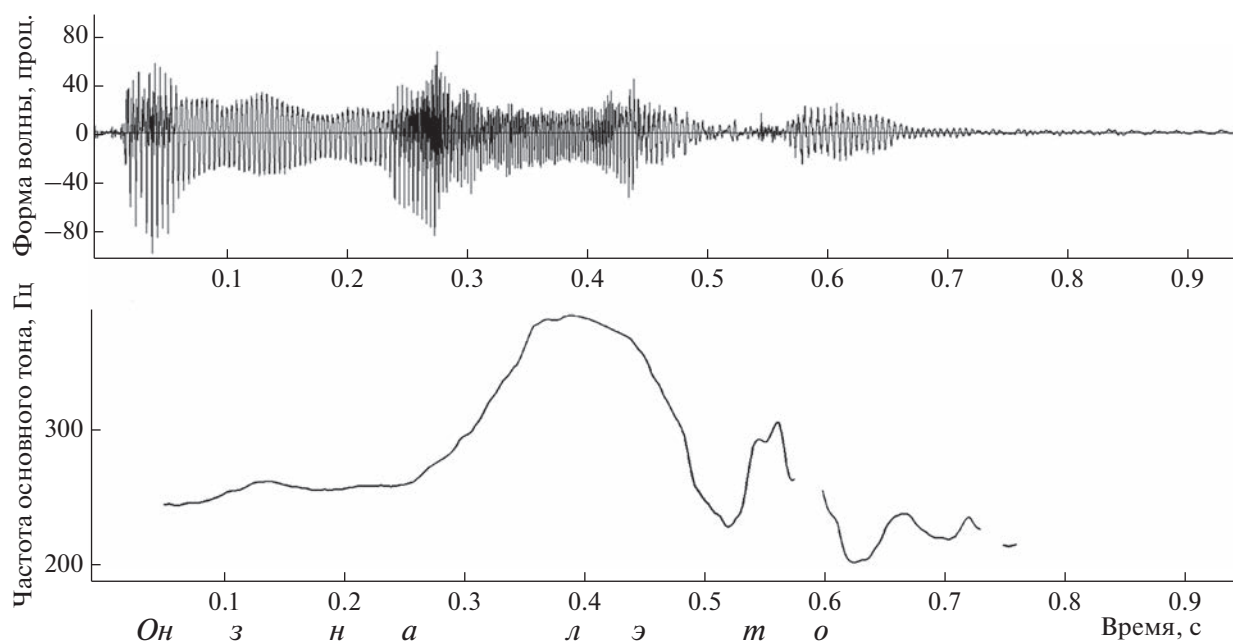


Рис. 4. Тонограмма стимула *S4* – вопросительного предложения *Он знал это?*

ские механизмы, и, соответственно, для подтверждения нейрофизиологической гипотезы о существовании различий в естественных нейросетях обработки речи и языка при их восприятии в данной статье представлены результаты анализа данных фМРТ-эксперимента, касающиеся восприятия испытуемыми только первых двух стимулов *S1* и *S2* – собственно речевого (вопросительная

вокализация) и вокального сигнала с минимальным языковым наполнением (вопросительная холофраза), соответственно.

В постэкспериментальном опросе установлено, что все стимулы воспринимались испытуемыми как вопросительные высказывания, произнесенные женским голосом; ответов, которые бы определяли голос как мужской, детский или ис-

кусственный, респонденты не давали. Все испытуемые в соответствии с заданием экспериментатора устно воспроизводили каждый стимул, воспроизведение обсуждаемых здесь вокализации и холофразы во всех случаях было качественно и интонационно адекватно предъявляемым стимулам. Испытуемые описывали содержание коммуникативной ситуации как обращение говорящего (голос диктора) с вопросами, в том числе к реципиентам (“как будто меня спрашивают”).

Математико-статистический анализ функциональных данных, проведенный с использованием метода прямого сравнения ($S1 > S2$), выявил следующие области активации головного мозга человека (ГМЧ), значимо отличающиеся ($p \leq 0.001$) при выполнении задачи восприятия речевого стимула $S1$ и речезыкового стимула $S2$: *frontal pole (l)*, *middle frontal gyrus (r)*, *postcentral gyrus (l)*, *superior parietal lobule (l)*, *frontal orbital cortex (r)*, *thalamus (l)*, *caudate (l)*, *vermis 6*. Общее количество вокселей, связанных с отличием фрагментов двух обсуждаемых типов нейросетей в пользу “нейросети речи”, при прямом сравнении составило 41 воксел (328 мм^3).

Процедура обратного сравнения ($S2 > S1$) позволила установить области ГМЧ, значимо отличающиеся ($p \leq 0.001$) при восприятии речезыкового стимула $S2$ по сравнению с собственно речевым стимулом $S1$: *frontal pole (r)*, *middle frontal gyrus (r)*, *precentral gyrus (l)*, *middle temporal gyrus (posterior division, r)*, *middle temporal gyrus (posterior division, l)*, *lateral occipital cortex (superior division, l)*, *paracingulate gyrus (l)*, *precuneous cortex*, *temporal occipital fusiform cortex (r)*, *cerebellum 3 (l)*, *cerebellum 4,5 (l)*. При приращении языкового средства по сравнению с $S1$ и с учетом процесса интеграции языковой информации в речевую форму, как это происходит в $S2$, большее количество областей активации, различающих две исследуемые сети, было ожидаемо. Зафиксирован и больший объем фрагмента, отличающего данную нейросеть по сравнению с первой в пользу обработки простейшего устного вербального стимула $S2$, — 62 вокселя (496 мм^3).

Таким образом, было получено подтверждение существования таких “фрагментов” в двух исследуемых нейрональных сетях, которые с высокой степенью достоверности отличают восприятие (а) “чистой” речевой формы и (б) минимальной интегративной речезыковой формы высказывания. Во втором случае следует предполагать, что система активации при восприятии речезыкового стимула отражает, помимо реагирования на семантику вербального знака и интонационный компонент высказывания, специфические, интегративного характера связи, обеспечивающие восприятие языкового средства с учетом семантики речевой формы, являющейся репрезен-

тантом социально-коммуникативных задач. Возможно, дальнейший анализ позволит прояснить вопрос об эффективных функциональных разноразноуровневых связях в нейрональных сетях, специализированных для восприятия собственно речевой формы и устного вербального высказывания, что может пролить свет и на вопрос о характере нейрональных процессов при восприятии интегрированной речезыковой информации, поскольку ее восприятие и понимание требует декомпозиции сигнала (как минимум на *что* говорится и *как/зачем* говорится) и в норме — последующей реинтеграции для принятия решения о социальном и/или речевом действии.

Анализ и интерпретация функций выявленных областей в процессах восприятия речи и языка, как представляется, имеет смысл только в контексте анализа их функциональной связанности с другими областями ГМЧ, образующими целостные структуры обеих сетей. Это позволит установить, относятся ли они к ядерной или периферийной и “дополнительной” структурам нейросетей восприятия речи и естественных речезыковых средств. Значимые в этом смысле результаты уже получены нами в полном объеме, однако требуют большого временного ресурса для их описания, которое составит содержание последующих наших публикаций. Следующими шагами также станут сопоставительные исследования собственно речевых сетей человека с функциональными и анатомо-функциональными моделями речевосприятия, полученными на выборках взрослых [3, 70, 72–79], в том числе в процедуре мета-анализа [80], а также данными, получаемыми в отношении нейросетей речи/языка в раннем онтогенезе устно-речевой функции человека [49–53], и моделями вокально-речевых функций филогенетически отдаленных и близких человеку видов [40–45].

Представленные здесь результаты вносят вклад в разработку проблемы латерализации функций речи и языка у взрослых: обе исследуемые нейросети в областях, их различающих, демонстрируют представленность обоих полушарий ГМЧ, с одной стороны, поддерживая современное понимание распределенности “функций” речи и языка по обширному ареалу ГМЧ и значимости межполушарных взаимодействий в процессах речи и языка, с другой стороны, впервые устанавливая этот же принцип организации для нейросетевых взаимодействий в собственно речевых процессах во взрослом мозге. Этот принцип для собственно речевых нейросетей обеспечивается, вероятно, специфической знаковостью вокально-интонационных единиц речи (в том числе, в связи с их речезановой спецификой/контрастированием и вариативностью как в границах жанра, так и вообще речевых характеристик говорящих [81]), динамической разверткой разных по типу и

сложности сигналов — речевых и речезыковых, сукцессивно-симультанном анализом при их восприятии, а также их обусловленностью, в первую очередь, системой социальных отношений и представлений. В отношении каждого из указанных здесь моментов требуется проведение специальных нейрофизиологических исследований, в том числе с использованием мультисенсорных стимулов, моделирующих параметры естественных речекommunikативных взаимодействий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило на выборке взрослых в экспериментальных условиях с использованием естественно-речевых стимулов установить существующие различия в нейронных структурах (сетях) обработки минимальных естественных коммуникативных единиц — собственно речевой и речезыковой. Это подтверждает психологическую концепцию речи как системы, отличной от языка, что для психологии речи открывает целый ряд новых возможностей, в том числе касающихся когнитивной обработки доязыковых и внеязыковых форм реализации речевой функции в процессах подготовки, (само)восприятия и декодирования речи.

В связи с полученными данными, определяющими принципиально новый уровень сложности в осмыслении и экспериментальных исследованиях речевых процессов, а также в связи с феноменологической спецификой человеческой речи, для которой использование языка является одним из аспектов, а цели лежат, как правило, за границами языкового содержания, требуется интенсификация психо- и нейрофизиологических исследований речезыковых процессов, в том числе с учетом визуальной обработки человеком социального содержания коммуникативных ситуаций (как было системно показано в [7]).

В отношении структурно-динамического содержания нейронных процессов, обеспечивающих восприятие и продуцирование интегративных речезыковых структур ([66]; в сравнении с [68]), возникает необходимость исследовать области ГМЧ с функциями метапроцессов, в том числе в онтогенезе речи человека.

Этические нормы. Исследование проведено в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены локальным этическим комитетом НИЦ “Курчатовский институт” (Москва).

Информированное согласие. Каждый участник исследования представил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения ему потенциальных

рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Финансирование работы. Исследование проводили в рамках Тематического плана НИЦ “Курчатовский институт” (приказ № 2180 от 18.08.2022).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

Вклад авторов в публикацию. И.Г. Маланчук — теоретический анализ, разработка программы исследования и стимульного материала, иллюстрации, В.А. Орлов — обработка фМРТ-данных, описание математико-статистических процедур, С.И. Карташов — осуществление процедуры фМРТ-записи, ее описание, Д.Г. Малахов — разработка экспериментальной парадигмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Heuvel M.P., Sporns O. Rich-club organization of the human connectome // J. Neurosci. 2011. V. 31. № 44. P. 15775.
2. Poli D., Pastore V.P., Martinoia S., Massobrio P. From functional to structural connectivity using partial correlation in neuronal assemblies // J. Neural Eng. 2016. V. 13. № 2. P. 026023.
3. Tremblay P., Dick A.S. Broca and Wernicke are dead, or moving past the classic model of language neurobiology // Brain Lang. 2016. V. 162. P. 60.
4. Hamilton L.S., Oganian Yu., Hall J., Chang E.F. Parallel and distributed encoding of speech across human auditory cortex // Cell. 2021. V. 184. № 18. P. 4626.
5. Берлов Д.Н., Никитина Е.А. Функциональные ансамбли в мозге человека и животных // Физиология человека. 2021. Т. 47. № 5. С. 118.
Berlov D.N., Nikitina E.A. Functional ensembles in the brain of human and animals // Human Physiology. 2021. V. 47. № 5. P. 579.
6. Steinschneider M., Nourski K.V., Rhone A.E. et al. Differential activation of human core, non-core and auditory-related cortex during speech categorization tasks as revealed by intracranial recordings // Front. Neurosci. 2014. V. 8. P. 240.
7. Щемелева О.В., Жукова О.В., Шелепин Ю.Е. и др. Электрофизиологические показатели деятельности мозга в процессе вербального и невербального взаимодействия собеседников // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 6. С. 16.
Shchemeleva O.V., Zhukova O.V., Shelepin Yu.E. et al. Electrophysiological indicators of brain activity in the process of verbal and non-verbal communication during the dialogue // Human Physiology. 2019. V. 45. № 6. P. 587.
8. Weiller C., Bormann T., Saur D. et al. How the ventral pathway got lost — And what its recovery might mean // Brain and Lang. 2011. V. 118. № 1-2. P. 29.
9. Больгина Т.А., Малютина С.А., Завьялова В.В. и др. Парадигма для определения латерализации языка в мозге: естественнаучный метод на службе лингвистики // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. 2016. № 3(91). С. 83.

- Bolgina T.A., Malyutina S.A., Zavyalova V.V. et al.* The paradigm of language lateralization in the brain: natural sciences method for linguistics // *Russ. Found. Basic Res. J.* 2016. № 3(91). P. 83.
10. *Жирнова В.А., Зырянов А.С., Гордеева Е.А. и др.* Функциональное интраоперационное картирование левой височной доли: задание имеет значение / Когнитивная наука в Москве: новые исследования // Материалы конференции, Москва, 19 июня 2019 г. Издательство: БукиВеди, 2019. С. 609.
 11. *Черниговская Т.В., Давтян С.Э., Петрова Н.Н., Стрельников К.Н.* Специфика полушарной асимметрии восприятия интонаций в норме и при шизофрении // *Физиология человека.* 2004. Т. 30. № 4. С. 32.
Chernigovskaya T.V., Davtian S.E., Petrova N.N., Strel'nikov K.N. Hemispheric asymmetry in prosody perception by healthy subjects and schizophrenic patients // *Human Physiology.* 2004. V. 30. № 4. P. 403.
 12. *Бахтин М.М.* Проблема речевых жанров / Эстетика словесного творчества. М.: Искусство, 1979. С. 237.
 13. *Шмелева Т.В.* Модель речевого жанра / Жанры речи. Вып. 1. Саратов: "Колледж", 1997. С. 88.
 14. *Седов К.Ф.* Общая и антропоцентрическая лингвистика. М.: Изд. Дом ЯСК, 2016. 440 с.
 15. *Дементьев В.В.* Теория речевых жанров: Монография. М.: Знак, 2010. 600 с.
 16. *Балашова Л.В., Дементьев В.В.* Русские речевые жанры. 2-е изд. М.: Изд. Дом ЯСК, 2022. 832 с.
 17. *Брызгунова Е.А.* Интонация / Русская грамматика. М.: Наука, 1980. Т. 1. С. 96.
 18. *Кодзасов С.В.* Исследования в области русской просодии. М.: Языки славянских культур, 2009. 491 с.
 19. *Янко Т.Е.* Интонационные стратегии русской речи в сопоставительном аспекте. М.: Языки славянских культур, 2008. 312 с.
 20. *Янко Т.Е.* Просодии и жесты как средства выражения иллокуций / Слово и жест. Научная конференция, посвященная памяти Е.А. Гришиной ("Гришинские чтения"), Москва, 8 февраля 2018 г. М.: Институт русского языка им. В.В. Виноградова РАН, 2018. С. 24.
 21. *Yanko T.E.* The system of the Russian prosody // *Przegląd Wschodnioeuropejski. (East European Rev.)* 2020. V. 11. № 1. P. 317.
 22. *Янко Т.Е.* Интеграция речевых актов в структуру дискурса: просодические стратегии // Когнитивные исследования языка. 2019. № 38. С. 587.
Yanko T.E. [Speech acts in discourse: the prosodic strategies of marking the discourse links] // *Cognitive Studies of Language.* 2019. № 38. P. 587.
 23. *Маланчук И.Г.* Речь как психический процесс: Монография. Красноярск: КГПУ им. В.П. Астафьева, 2009. 285 с.
 24. *Аннушкин В.И.* История русской риторики: Хрестоматия. М.: Флинта, 2016. С. 246.
 25. Новое в зарубежной лингвистике. Вып. 17. Теория речевых актов. М.: Прогресс, 1986. 423 с.
 26. *Вежбицка А.* Речевые жанры / Жанры речи. Вып. 1. Саратов, Колледж, 1997. С. 99.
 27. Антология речевых жанров: повседневная коммуникация. Под ред. Седова К.Ф. М.: Лабиринт, 2007. 118 с.
 28. Эффективное речевое общение (базовые компетенции). Под ред. Сковородникова А.П. Красноярск: СФУ, 2014. 852 с.
 29. *Веккер Л.М.* Психика и реальность: Единая теория психических процессов. М.: Смысл, 1998. Гл. 21. 679 с.
 30. *Львов М.Р.* Язык и речь // Начальная школа. 2001. № 1. С. 83.
 31. *Коваленко Н.А.* Системный подход к фразовой просодии слова: автореф. дис. ... д-ра филол. наук. М.: ИЯ РАН, 2002. 42 с.
 32. *Понов М.Б.* Фонетика современного русского языка: учеб. для вузов. СПб.: СПбГУ, 2014. 303 с.
 33. *Беар М., Коннорс Б.В., Парадизо М.А.* Нейронауки. Исследование мозга. 4-е изд., в 3-х т. Т. 3. Мозг и поведение. Изменяющийся мозг. М., СПб.: Диалектика, 2021. Гл. 20. С. 279.
 34. *Баарс Б., Гейдж Н.* Мозг, познание, разум: введение в когнитивные нейронауки: в 2-х т. Т. 2. 5-е изд. М.: Лаборатория знаний, 2021. 464 с.
 35. *Циркин В.И., Трухина С.И., Трухин А.Н.* Нейрофизиология: основы психофизиологии: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Юрайт, 2022. 577 с.
 36. *Болгина Т.А., Малиютина С.А., Завьялова В.В. и др.* Русскоязычная фМРТ-парадигма для локализации речевых зон в мозге / Седьмая международная конференция по когнитивной науке. Светлогорск, 20–24 июня 2016 г. Тезисы докладов. 2016. С. 163.
 37. *Egorova N., Shtyrov Yu., Pulvermüller F.* Brain basis of communicative action in language // *Neuroimage.* 2016. V. 125. P. 857.
 38. *Guex R., Grandjean D., Frühholz S.* Behavioral correlates of temporal attention biases during emotional prosody perception // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. № 1. P. 16754.
 39. *Sheppard S., Stockbridge M., Murray L., Blake M.* The company prosodic deficits keep following right hemisphere stroke: a systematic review // *J. Int. Neuropsychol. Soc.* 2022. V. 28. № 10. P. 1075.
 40. *Petkov C.I., Jarvis E.D.* Birds, primates, and spoken language origins: behavioral phenotypes and neurobiological substrates // *Front. Evol. Neurosci.* 2012. V. 4. P. 12.
 41. *Scharff C., Friederici A.D., Petrides M.* Neurobiology of human language and its evolution: primate and non-primate perspectives // *Front. Evol. Neurosci.* 2013. V. 5. P. 1.
 42. *Searcy W.A., Nowicki S.* Birdsong learning, avian cognition and the evolution of language // *Anim. Behav.* 2019. V. 151. P. 217.
 43. *Lipkind D., Geambasu A., Levelt C.* The development of structured vocalizations in songbirds and humans: a comparative analysis // *Top. Cogn. Sci.* 2020. V. 12. № 3. P. 894.
 44. *Bruno J.H., Jarvis E.D., Liberman M., Tchernichovski O.* Birdsongs learning and culture: analogies with human

- spoken language // *Ann. Rew. Ling.* 2021. V. 7. № 1. P. 449.
45. Jüchter C., Beutelmann R., Klump G.M. Speech sound discrimination by Mongolian gerbils // *Hear. Res.* 2022. V. 418. P. 108472.
 46. Scott S.K., Wise R.J.S. The functional neuroanatomy of prelexical processing in speech perception // *Cognition*. 2004. V. 92. № 1–2. P. 13.
 47. Ляксо Е.Е. Вокально-речевое развитие ребенка в первый год жизни // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова*. 2003. Т. 89. № 2. С. 207.
Lyakso E.E. [Vocal and speech development of a child in the first year of life] // *Ross. Fiziol. Zh. Im. I. M. Sechenova*. 2003. V. 89. № 2. P. 207.
 48. Цейтлин С.Н. Некоторые особенности начального детского синтаксиса / Русское слово и русский текст: история и современность. Сб. науч. статей. СПб.: РГПУ им. А.И. Герцена, 2007. С. 189.
 49. Mahmoudzadeh M., Dehaene–Lambertz G., Fournier M. et al. Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers // *PNAS*. 2013. V. 110. № 12. P. 4846.
 50. Friedrich M., Friederici A.D. The origins of word learning: Brain responses of 3-month-olds indicate their rapid association of object and words // *Dev. Sci.* 2015. V. 20. № 2. P. e12357.
 51. Dehaene–Lambertz G. The human infant brain: A neural architecture able to learn language // *Psychon. Bull. Rev.* 2017. V. 24. № 1. P. 48.
 52. Fló A., Benjamin L., Palu M., Dehaene–Lambertz G. Sleeping neonates track transitional probabilities in speech but only retain the first syllable of words // *Sci. Rep.* 2022. V. 12. № 1. P. 4391.
 53. Menn K.H., Michel C., Meyer L. et al. Natural infant-directed speech facilitates neural tracking of prosody // *Neuroimage*. 2022. V. 251. P. 118991.
 54. Stern D.N. The first relationship: infant and mother. Cambridge: Harvard Univ. Press, 1977. 149 p.
 55. Маланчук И.Г. Развитие диалогических форм речи у ребенка на первом году жизни / Детская речь как предмет лингвистического исследования: материалы междунар. конф. Отв. ред. С.Н. Цейтлин. СПб., 2004. С. 163.
 56. Dore J. The development of speech acts. The Hague: Mouton, 1975.
 57. Николаева Т.М. О “лингвистике речи” (в частности, о междометии) // *Вопросы языкознания*. 2015. № 4. С. 7. Nikolaeva T.M. [On the “linguistics of speech”] // *Voprosy Jazykoznanija*. 2015. № 4. P. 7.
 58. Выпуск 5: Жанр и культура / Жанры речи. Отв. ред. В.В. Деметьев. Саратов: ИЦ “Наука”, 2007. 440 с.
 59. Сидоренко А.В. Детская клятва в советскую эпоху: речевые жанровые характеристики // *Жанры речи*. 2016. № 2(14). С. 72.
Sidorenko A.V. Children’s oath in the Soviet era: speech genre characteristics // *Speech Genres*. 2016. № 2(14). P. 72.
 60. Кошечкина О.В. Ребенок, речевой жанр и творчество: к проблеме становления жанров в детской речи / *Жанры речи: сб. науч. ст. Саратов; М.: Лабиринт*, 2012. Вып. 8. С. 237.
 61. Пешковский А.М. Русский синтаксис в научном освещении. 8-е изд., доп. М.: Языки славянской культуры, 2001. 544 с.
 62. Рабенко Т.Г. Инвариантные и варианты признаки жанров естественной письменной речи (на материале жанров “личный дневник”, “личное письмо”, “личная записка”) // *Жанры речи*. 2020. № 1(25). С. 6.
Rabenko T.G. The genres of natural writing “personal diary”, “personal letter”, “personal note”: invariant and variant // *Speech Genres*. 2020. № 1(25). P. 6.
 63. Gillis M., Vanthornhout J., Simon J.Z. et al. Neural markers of speech comprehension: measuring EEG tracking of linguistic speech representations, controlling the speech acoustics // *J. Neurosci.* 2021. V. 41. № 50. P. 10316.
 64. Broderick M.P., Zuk N.J., Anderson A.J., Lalor E.C. More than words: neurophysiological correlates of semantic dissimilarity depend on comprehension of the speech narrative // *Eur. J. Neurosci.* 2022. V. 56. № 8. P. 5201.
 65. Preisig B.C., Riecke L., Hervais-Adelman A. Speech sound categorization: The contribution of non-auditory and auditory cortical regions // *Neuroimage*. 2022. V. 258. P. 119375.
 66. Tomasello R., Grisoni L., Boux I. et al. Instantaneous neural processing of communicative functions conveyed by speech prosody // *Cereb. Cortex*. 2022. V. 32. № 21. P. 4885.
 67. Кантер Л.А. Просодические характеристики речи как объект системного анализа: автореф. дис. ... докт. филол. наук. М.: ИЯ АН СССР, 1990. 52 с.
 68. Ischebeck A.K., Friederici A.D., Alter K. Processing prosodic boundaries in natural and hummed speech: an fMRI study // *Cereb. Cortex*. 2008. V. 18. № 3. P. 541.
 69. Steinhauer K., Alter K., Friederici A.D. Brain potentials indicate immediate use of prosodic cues in natural speech processing // *Nat. Neurosci.* 1999. V. 2. № 2. P. 191.
 70. Ćwiek A., Fuchs S., Draxler Ch. et al. Novel vocalizations are understood across cultures // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. № 1. P. 1.
 71. Aso M., Takamichi Sh., Takamune N., Saruwatari H. Acoustic model-based subword tokenization and prosodic-context extraction without language knowledge for text-to-speech synthesis // *Speech Comm.* 2020. V. 125. P. 53.
 72. Dick A.S., Bernal B., Tremblay P. The language connectome: new pathways, new concepts // *Neuroscientist*. 2014. V. 20. № 5. P. 453.
 73. Ganssere C., Højlund A., Leminen A. et al. Task-free auditory EEG paradigm for probing multiple levels of speech processing in the brain // *Psychophysiology*. 2018. V. 55. № 11. P. e13216.
 74. Brown E.C., Stedelin B., Koike S. et al. Speech-related auditory salience detection in the posterior superior temporal region // *Neuroimage*. 2022. V. 248. P. 118840.
 75. Soltani A., Koechlin E. Computational models of adaptive behavior and prefrontal cortex // *Neuropsychopharmacol.* 2022. V. 47. № 1. P. 58.

76. *Schmahmann J.D., Guell X., Stoodley C.J., Halko M.A.* The theory and neuroscience of cerebellar cognition // *Annu. Rev. Neurosci.* 2019. V. 42. P. 337.
77. *Runnqvist E., Chanoine V., Strijkers K. et al.* The cerebellum is involved in internal and external speech error monitoring // *Cereb. Cortex Comm.* 2021. V. 2. № 2. P. tgab038.
78. *LeBel A., Jain S., Huth A.G.* Voxelwise encoding models show that cerebellar language representations are highly conceptual // *J. Neurosci.* 2021. V. 41. № 50. P. 10341.
79. *Morales M., Patel T., Tamm A. et al.* Similar neural networks respond to coherence during comprehension and production of discourse // *Cereb. Cortex.* 2022. V. 32. № 19. P. 4317.
80. *Battiston F., Guillon J., Chavez M. et al.* Multiplex core-periphery organization of the human connectome // *J. R. Soc. Interface.* 2018. V. 15. № 146. P. 20180514.
81. *Severijnen G.G.A., Bosker H.R., Piai V., McQueen J.M.* Listeners track talker-specific prosody to deal with talker-variability // *Brain Res.* 2021. V. 1769. P. 147605.

Differentiation of the Functional Systems of Speech and Language and the Study of the Differences of the Neural Networks That Support Them

I. G. Malanchuk^{a, *}, V. A. Orlov^a, S. I. Kartashov^a, D. G. Malakhov^a

^aNational Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

*E-mail: cora1@inbox.ru

The paper deals with the problem of differentiation of human speech and language systems. Based on the modern ideas in the field of speech psychology, speech study, intonology, the concept of units (forms) of speech as non-linguistic phenomena is formed. These phenomena function as translators of illocutionary meanings in human communication, which mostly are communicative and social goals, as well as the quality of social relations. To support the concept of "Speech vs. Language", the results of an fMRI study conducted on a sample collection of adults are presented. The differences between the neural networks of the human brain that provide the perception of natural forms of oral speech having the same pragmasemantic content — the actual speech and the minimal structure of speech-language signals are established. Due to the data obtained, the prospects of research related to the analysis of functional connectivity in the structures of two types of networks, as well as with the sequential complication of the speech and language components of the statement and the presentation of multimodal multilevel natural speech-communicative stimuli are discussed. The analysis of the differences between the processes and neural networks of speech and language is important for the development of speech synthesis technologies, diagnostic and communicative artificial intelligence.

Keywords: speech, language, differentiation of speech and language processes, fMRI, oral speech perception, speech and language neural networks, adults.

УДК 612.821+159.95

ФРОНТО-ПАРИЕТАЛЬНЫЕ ПАТТЕРНЫ ДЕЛЬТА- И БЕТА-ОСЦИЛЛЯЦИЙ ЭЭГ КАК МАРКЕРЫ СТРАТЕГИЙ КРЕАТИВНОСТИ

© 2023 г. О. М. Разумникова*

ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия

*E-mail: razoum@mail.ru

Поступила в редакцию 18.11.2022 г.

После доработки 04.02.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Механизму кооперации фронтально-париетальной системы и дефолт-системы уделяется в последнее время много внимания, так как их “преднастройка” в покое и последующая динамика функционального взаимодействия связывается с индивидуальным разнообразием стратегий выполнения заданий при тестировании креативности. Для исследования ЭЭГ-коррелятов таких стратегий выполнен анализ регионарных особенностей Δ - и β -осцилляций в фоне и их сопоставление с результатами предварительного выполненного тестирования креативности и интеллекта у 37 студентов университета (18 ± 1.1 лет; 27 девушек и 10 юношей). Показатели оригинальности ответов при тестировании креативности вычисляли с использованием созданных авторами ранее баз данных для субтестов “Круги”, “Незавершенные фигуры”, “Необычное использование обычных предметов” и экспертной оценки оригинальности предложений, составленных из слов, относящихся к отдаленным семантическим категориям. Вербальный и образный компоненты интеллекта оценивали согласно субтестам структуры интеллекта Амтхауэра. С использованием кластерного анализа перечисленных показателей креативности и интеллекта были выделены две группы участников исследования: одна ($ГР_{KIQ}$) характеризовалась сочетанием более высоких значений интеллекта и оригинальности ответов в тех заданиях, где требовался отказ от стереотипных идей при ограничении времени их поиска, а другая ($ГР_K$) — сравнительно более низким интеллектом, но высокой оригинальностью решения проблемы в условиях тестирования креативности с разнообразием стимулов и без временных ограничений. Эти две группы отличались регионарной организацией мощности Δ - и β_2 -ритмов и паттернами корреляций этих ритмов: $ГР_{KIQ}$ представлена генерализованной высокочастотной β -активностью и характеризуется корреляционной взаимосвязью с низкочастотными биопотенциалами лобной коры, $ГР_K$ — представлена более дифференцированной по отведениям β_2 -активностью при ее диффузно распределенной связи с Δ -ритмом с исключением передне-фронтальных областей. Обнаруженные эффекты можно рассматривать как “преднастройку” к стратегии “интеллектуального” поиска оригинального ответа в условиях сопротивления фиксации на стереотипной идее в $ГР_{KIQ}$ или к решениям на основе спонтанного поиска отдаленных ассоциаций в $ГР_K$.

Ключевые слова: креативность, интеллект, ЭЭГ, фронтально-париетальная система, дефолт-система, Δ - и β -осцилляции.

DOI: 10.31857/S013116462260094X, **EDN:** GISIRV

Интенсивные нейрофизиологические исследования креативности, развернувшиеся в последнее время, сосредотачиваются на выяснении закономерностей когнитивных процессов, лежащих в основе механизмов поиска оригинального решения проблемы, в том числе значения интеллекта и исполнительного контроля при решении поставленной задачи или вклада инсайтной стратегии [1–5]. Единого мнения в понимании взаимосвязи креативности и интеллекта, до сих пор, не достигнуто, по-видимому, в связи с тем, что эти психометрические конструкты представляют сложный комплекс ментальных операций: вни-

мание, память, воображение, формирование ассоциаций, в разной степени используемые при решении поставленных экспериментальных задач. Исследования взаимодействия креативности и интеллекта, преимущественно с применением томографических методов в последние годы, свидетельствуют об их общих структурных элементах в нейронной архитектуре мозга [5], а психометрические данные — о функциональном сходстве процессов селекции информации [4]. Остается, однако, не ясным, это сходство обеспечивается за счет генерализованных или специфических нейронных систем, требуемых для выполнения экс-

периментальных заданий вербальной или образной природы. Поэтому остаются актуальными вопросы: является ли креативность компонентом интеллекта, или, напротив, интеллект включен в структуру креативности, или креативность и интеллект связаны за счет общих нейронных механизмов селекции информации и использования ресурсов памяти.

Наряду с данными о широком представительстве структур мозга в ассоциации и с креативностью [6–11], и с интеллектом [12–16], имеются доказательства того, что связь этих когнитивных конструкторов опирается преимущественно на взаимодействие фронтальных исполнительных областей и задних регионов коры или систем *FPN* (*fronto-parietal network*) и “системы мозга по умолчанию” — *DMN* (*default mode network*) [5, 6, 16]. Причем исполнительный контроль внимания рассматривается как фактор, регулирующий вклад флюидного интеллекта и “блуждания мысли” (*mindwandering*) в креативное мышление, имеющих на разных его этапах и позитивное, и негативное значение [5].

Механизмам кооперации *FPN* и *DMN* уделяется в последнее время много внимания, так как их “преднастройка” в покое и динамика функционального взаимодействия связывается с индивидуальным разнообразием стратегий выполнения заданий при тестировании как вербальной, так и образной креативности [3, 17]. Например, показано, что *FPN* является медиатором связи вербальной креативности с активностью передней *DMN*, а визуальной креативности — ее задней части [17]. Усиление вклада *FPN* отражает доминирование исполнительного контроля в поиске новых решений проблемы, а *DMN* — спонтанную генерацию идей [6, 7, 18]. Согласно данным разных авторов, креативное мышление сопровождается динамичной реорганизацией этих систем с регионарным расширением функциональных нейронных сетей, включая левую среднюю височную извилину и слуховую систему для вербальной креативности [19] или височно-теменные и префронтальные области для образной креативности [20]. Причем в последнем случае специфика подключения отдельных областей указанных регионов коры определялась факторами, сформированными из разных показателей креативности: фактор, включающий беглость и оригинальность, был положительно связан с объемом мозга в структурах, близких к *DMN*, а фактор, объединяющий показатели разработанности рисунка и сопротивления фиксации ассоциирован с лобно-височными областями.

В процессе накопления данных первоначальное представление о доминировании правого полушария при решении экспериментальных творческих заданий [21] изменилось, так как участие

левой дорзолатеральной префронтальной коры [22] или левой передней цингулярной коры [20] показано, например, при тестировании невербальной креативности; более того, латеральные изменения показателя функциональной связности в дорзолатеральной префронтальной коре, ассоциированной с невербальной креативностью, оказываются зависимы от активности *FPN* и *DMN* [23]. Вместе с этим, появились новые доказательства ключевого значения функций правой фронтальной области коры для успешности дивергентного мышления, которые были получены на основе анализа разных компонентов интеллекта: флюидного, кристаллизованного (для тестирования которого использовались вербальные задания) и зрительно-пространственного [5]. Следовательно, для понимания закономерностей формирования разных функциональных нейронных систем, обеспечивающих разные формы креативности, и особенностей их реорганизации в зависимости от структуры интеллекта требуются дальнейшие исследования.

Для изучения функционального значения фонового состояния мозга используются не только его томографические, но и энцефалографические характеристики [1, 23–25]. Среди разных частотных диапазонов ЭЭГ чаще других рассматривается синхронизация/десинхронизация α -колебаний, что обусловлено их информативностью в отношении специфики процессов торможения/активации в нейронных сетях, отражающей и креативность, и интеллект (*IQ*) [1, 26–28]. Показано, что вариативность флюидного *IQ* связана с обновлением рабочей памяти, тогда как предикторами креативности является не только этот компонент исполнительной системы, но и тормозные функции [27]. Баланс фоновой активности фронтальных и задних отделов коры может отражать индивидуальный стиль решения проблемы, в том числе предпочтение инсайтной или аналитической стратегии [2, 27, 29, 30], причем в качестве индикаторов такого баланса рассматриваются не только α , но и низкочастотные Δ -, θ - и высокочастотные β -осцилляции [18, 24, 31–33]. Δ -ритм представляет интерес для анализа креативности, так как увеличение его мощности отражает подавление усвоенного доминантного поведения и указывает на эффективность нового обучения, а θ - и β -осцилляции рассматриваются как энцефалографические корреляты обработки информации за счет функций *DMN* и *FPC* [31, 34].

Ранее нами было показано усиление взаимодействия нейронных ансамблей передних областей коры с задними отделами левого полушария у лиц, характеризующихся сравнительно высокими показателями интеллекта и креативности по сравнению с теми, кто обладал их меньшими значениями [1]. В дальнейшем было установлено, что фронтальные Δ - и β -ритмы могут служить

Таблица 1. Результаты описательной статистики для показателей интеллекта и креативности

Показатель	Среднее	SD	Минимум	Максимум
Интеллект				
Вербальный (IQ_v)	105.3	6.2	90.5	114.5
Образный (IQ_s)	105.9	6.9	90.5	124.0
Оригинальность				
Круги (Ок)	1.2	1.2	0.1	5.8
Незавершенные фигуры (Онф)	3.4	1.4	0.8	7.1
Необычное использование (Они)	1.4	1.2	0.1	4.7
Составление предложений (Осп)	3.7	2.4	0.0	9.8

Примечание: IQ_v – вербальный компонент интеллекта, IQ_s – зрительно-пространственный компонент интеллекта, Ок – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Круги”, Онф – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Незавершенные фигуры”, Они – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Необычное использование”, Осп – показатель оригинальности при выполнении субтеста “Составление предложения”.

предикторами как невербальной креативности, так и вербального интеллекта [32]. Целью настоящего исследования стало выяснение регионарных особенностей паттернов Δ - и β -ритмов, как “преднастройки” для реализации вербальной или невербальной творческой деятельности и ее потенциальной связи со значениями вербальных и зрительно-пространственных компонентов интеллекта.

МЕТОДИКА

В исследовании принимали участие 37 чел. (студенты 18 ± 1.1 лет; 27 девушек и 10 юношей).

Для определения вербального и образного (зрительно-пространственного) компонентов интеллекта использовали тест структуры интеллекта Амтхауэра: средние значения выполнения двух вербальных (субтесты 2 и 3) (IQ_v) и двух невербальных зрительно-пространственных заданий (субтесты 7 и 8) (IQ_s). Для оценки невербальной образной креативности применяли субтесты Торренса “Круги” и “Незавершенные фигуры”, вербальной – методику Гилфорда “Необычное использование обычного предмета” и составление осмысленного предложения с включением трех слов-стимулов (существительных из отдаленных семантических категорий). Показатели оригинальности ответов при выполнении трех первых методик вычисляли на основе соответствующей базы данных как число, обратное количеству таких же идей [35]. Оригинальность предложений оценивали трое подготовленных экспертов, имеющие опыт работы с данной методикой (α Кронбаха для полученных оценок составила 0.82).

Регистрацию ЭЭГ в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами выполняли с помощью аппаратуры и программного обеспечения “Мицар-201” (Россия) в 19-ти отведениях (Fp_1 , Fp_2 , F_7 , F_3 , F_z , F_4 , F_8 , T_3 , C_3 , C_z , C_4 , T_4 , T_5 , P_3 ,

P_z , P_4 , T_6 , O_1 , O_2), расположенных согласно системе 10/20, с объединенным референтным ушным электродом, заземляющий электрод в отведении Fp_z . Сопротивление электродов менее 5 кОм. Режекторный фильтр 50/60 Гц, параметры фильтров верхних (ФВЧ) и нижних (ФНЧ) частот, соответственно, 0.53 и 50 Гц. Для анализа активности мозга выбирали 2-секундные безартефактные отрезки ЭЭГ с перекрытием в 50% общей длительностью 60 с. Частота дискретизации 250 Гц. Для каждого отведения методом быстрого преобразования Фурье вычисляли спектральную плотность ЭЭГ в шести частотных диапазонах: Δ (1–4 Гц), θ (4–7 Гц), α_1 (7–10 Гц), α_2 (10–13 Гц), β_1 (13–20 Гц) и β_2 (20–30 Гц). Для статистического анализа использовали натуральный логарифм значений мощности ЭЭГ в Δ - и β_2 -диапазонах согласно поставленной цели исследования.

Статистический анализ данных выполняли с применением лицензионного пакета программ Statistica 13. 3 (SN: JPBZ912J057923CNET2ACD-K).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 приведены полученные результаты тестирования показателей интеллекта и креативности.

Кластерная организация показателей креативности и интеллекта. На первом этапе анализа данных для исследования организации показателей креативности и интеллекта был использован иерархический агломеративный метод кластеризации предварительно нормализованных данных (нормализация выполнялась делением на среднее значение). После опробования разных методов оказалось, что лучшее разделение кластеров происходит с применением метода Уорда с евклидовой метрикой (рис. 1). Сходную структуру кластеров, объединяющих показатели интеллекта и креатив-

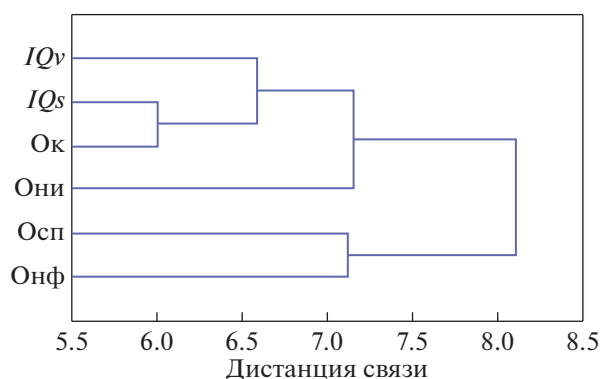


Рис. 1. Дендрограмма мер близости показателей вербальных и невербальных компонентов интеллекта и креативности согласно кластеризации Уорда.

IQv — вербальный компонент интеллекта, *IQs* — зрительно-пространственный компонент интеллекта, *Ок* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Круги”, *Они* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Необычное использование”, *Онф* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Незавершенные фигуры”, *Осп* — показатель оригинальности при выполнении субтеста “Составление предложения”.

ности, дает применение метода полных связей, основанного на определении максимальных значений парных расстояний между объектами в разных кластерах. Так как алгоритм Уорда основан на определении минимума дисперсий в гипотетических кластерах, то сформированную иерархическую структуру показателей интеллекта и креативности можно считать оптимально устойчивой для интерпретации полученных результатов.

Приведенная на рис. 1 структура кластеров свидетельствует о наиболее тесной связи *IQs* и образной оригинальности при выполнении субтеста “Круги”, и объединении этого кластера вместе с *IQv* и показателем вербальной оригинальности при “необычном использовании обычного предмета” в общий кластер (кластер 1). Показатели оригинальности ответов при выполнении двух других субтестов “Незавершенные фигуры” и “Составление предложения” формируют отдельный от первой группы переменных кластер, что указывает на другую стратегию поиска решения поставленной задачи (кластер 2).

Для дальнейшего анализа ЭЭГ-данных были сформированы выборки с использованием кластеризации показателей интеллекта и креативности методом *K-Means*, который позволил разделить две группы, различающиеся значениями рассмотренных показателей. Состав этих групп был скорректирован на основании результатов иерархической кластеризации: $ГР_{KIQ}$ составили лица, продемонстрировавшие сравнительно высокие показатели по субтестам “Круги” и “Необычное использование обычного предмета” (вошедшие в кластер 1), а $ГР_K$ — “Незавершенные фигуры” и “Составление предложения” (вошедшие в кластер 2).

В результате дисперсионного анализа всех показателей креативности обнаружен эффект фактора ГРУППА ($F_{5,166} = 6.85$; $p < 0.0001$; $\eta^2 = 0.17$). Двухфакторный *ANOVA* с независимыми переменными ПОЛ (2) и ГРУППА (2), выполненный для каждого показателя интеллекта и креативности, выявил влияние только фактора ГРУППА ($2.69 < F_{1,33} < 12.5$, $0.001 < p < 0.1$) с более высокими значениями *IQ*, *Ок* и *Они* в $ГР_{KIQ}$ при сравнительно низких значениях *IQ*, но более высоких показателях *Онф* и *Осп* в $ГР_K$ (табл. 2).

Таким образом, целью дальнейшего анализа было выяснение ЭЭГ-коррелятов креативности, различающейся в группах, сформированных согласно выделенным разным стратегиям поиска решения проблемы. При этом мы ограничились анализом только Δ - и β -ритмов, так как ранее было показано их информативное значение в качестве предикторов невербальной креативности и вербального интеллекта [32].

Кластерная организация Δ - и β_2 -ритма в группах, различающихся структурой креативности и интеллекта. Для выяснения особенностей частотно-пространственной организации низко- и высокочастотных осцилляций в выделенных группах: $ГР_{KIQ}$ и $ГР_K$ также был использован иерархический агломеративный метод кластеризации Уорда с евклидовой метрикой. На рис. 2 показаны полученные для этих групп дендрограммы сформированных кластеров для Δ -ритма, а на рис. 3 — для β_2 .

Таблица 2. Количественный состав и нормализованные показатели интеллекта и креативности в двух группах, сформированных на основе результатов кластерного анализа данных методом *K-Means*

Группа	<i>n</i>	<i>M (n)</i>	<i>Ж (n)</i>	<i>IQv</i>	<i>IQs</i>	<i>Ок</i>	<i>Они</i>	<i>Онф</i>	<i>Осп</i>
$ГР_{K+IQ}$	17	5	12	0.51	0.39	0.47	0.36	−0.26	−0.35
$ГР_K$	20	5	15	−0.33	−0.27	−0.33	−0.35	0.19	0.39
<i>p</i>	н/д	н/д	н/д	0.02	0.05	0.001	0.02	0.10	0.01

Примечание: *n* — общее количество участников исследования, *M (n)* — количество мужчин, *Ж (n)* — количество женщин. Остальные обозначения см. табл. 1.

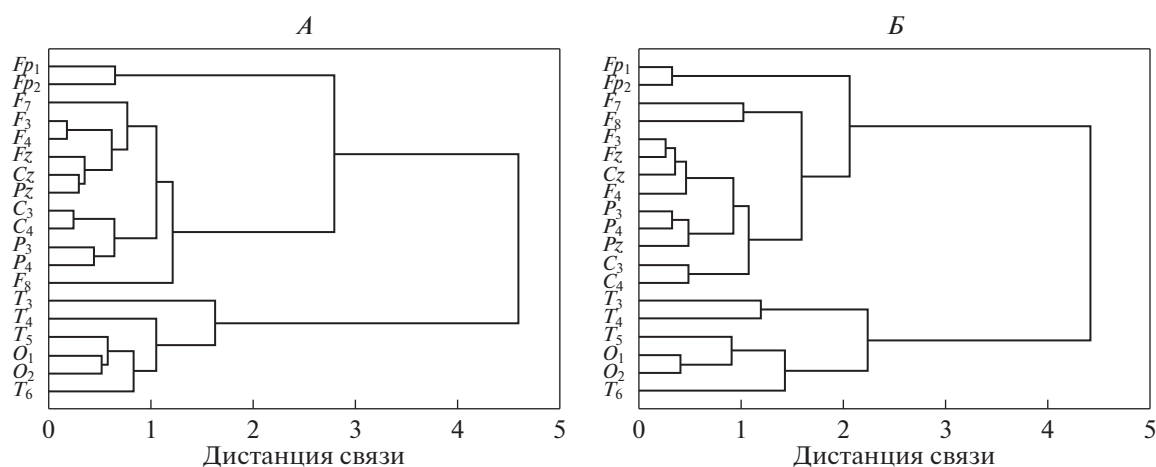


Рис. 2. Дендрограммы кластеров Δ -ритма, сформированных с применением метода Уорда и представляющих группы, различающиеся организацией креативности: связанной с интеллектом (А) и несвязанной с интеллектом (Б).

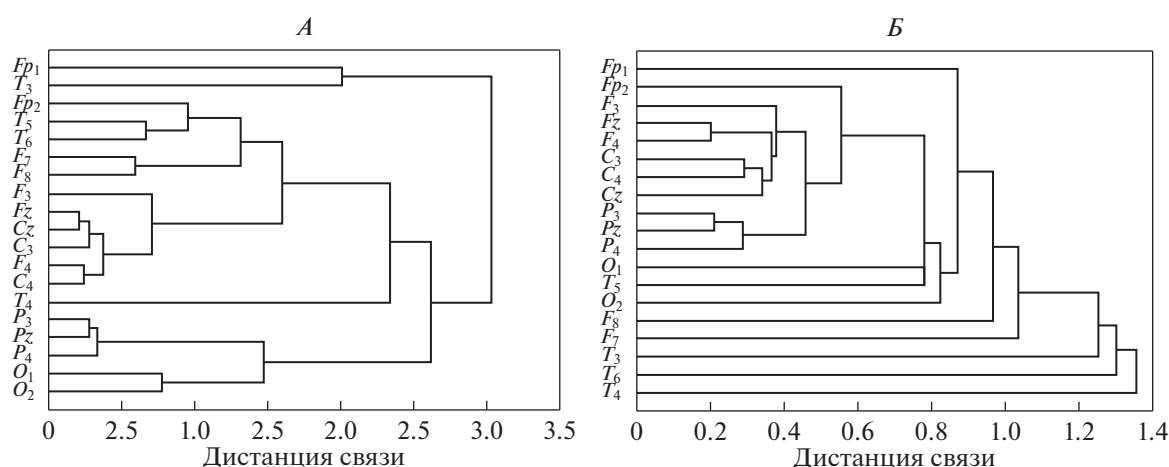


Рис. 3. Дендрограммы кластеров β_2 -ритма, сформированных с применением метода Уорда и представляющих группы, различающиеся организацией креативности: связанной с интеллектом (А) и несвязанной с интеллектом (Б).

Согласно кластерной организации Δ -ритма в обеих группах выделено по два кластера, однако ГР_{КИО} характеризуется большей дистанцией кластера, представляющего передние области коры при ведущем значении осцилляций в F_8 , тогда как в ГР_К полученные кластеры сходны по мере связности, а в объединении областей передней части коры ведущее значение принадлежит F_7 и F_8 (рис. 2) (специфика включения этих отведений в выделенные для ГР_{КИО} и ГР_К кластеры была доказана дополнительно выполненным кластерным анализом Δ -ритма только для передней части коры).

Регионарная организация β_2 -ритма представлена 2 кластерами в ГР_{КИО} (Fp_1 и Fp_2 формируют один кластер, остальные отведения – второй) и 4 кластерами в ГР_К (отведения T_3 , T_6 и T_4 отражают три отдельных кластера, а все остальные отве-

дения включены в другой, общий для них кластер) (рис. 3). При этом ведущую роль в объединении двух кластеров β -ритма в ГР_{КИО} имеет область, представленная T_4 , а в ГР_К – F_7 , F_8 и Fp_1 .

Для выяснения степени взаимодействия высокочастотных β_2 и низкочастотных Δ биопотенциалов в ГР_{КИО} и ГР_К был выполнен корреляционный анализ, результаты которого показаны на рис. 4 ($0.50 < r < 0.63$ при $0.008 < p < 0.05$; вертикально приведены отведения для Δ -ритма, горизонтально – для β_2).

Полученные результаты указывают на то, что различия между группами представлены более выраженными связями между Δ -ритмом в лобных участках коры и β_2 -осцилляциями в задних областях коры для ГР_{КИО} (рис. 4, А), тогда как ГР_К характеризуется более широко распределенными

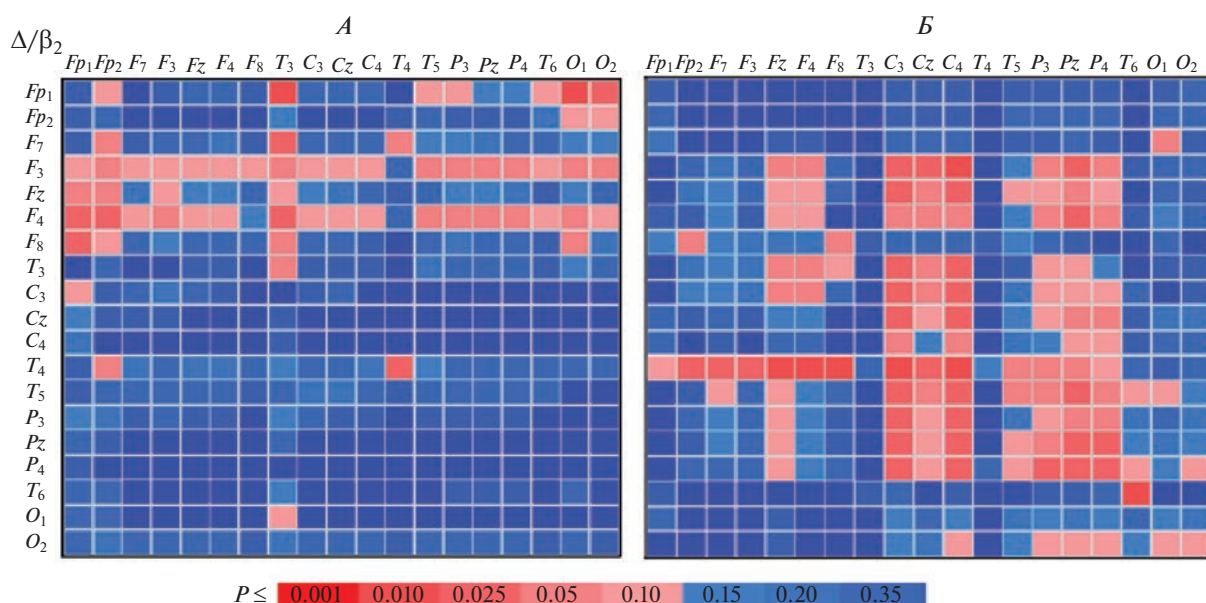


Рис. 4. Корреляционные карты между Δ (отведения по вертикали)- и β_2 (отведения по горизонтали)-ритмами для групп, различающихся организацией креативности: связанной с интеллектом (ГР_{КИО}, А) и несвязанной с интеллектом (ГР_К, Б).

корреляциями β_2 - и Δ -ритма с концентрацией в центрально-париетальных областях коры (рис. 4, Б).

Таким образом, можно заключить, что две выделенные группы участников исследования, различающиеся уровнем интеллекта и оригинальностью ответов при выполнении заданий, требующих отказа от стереотипных идей (ГР_{КИО}), или решения проблемы в условиях заданного разнообразия стимулов (ГР_К), характеризуются разными формами регионарной организации Δ - и β_2 -ритмов и их взаимосвязи. В ГР_{КИО} выделены по два кластера в каждом частотном диапазоне, представляющие разные формы объединения передних и задних отделов коры, отраженные во взаимосвязи низкочастотных биопотенциалов лобной коры и генерализованно представленной высокочастотной активности β -активности. ГР_К отличается регионарно более дифференцированно представленной кластеризацией β_2 -активности при ее диффузно распределенной связи с Δ -ритмом с исключением передне-фронтальных областей.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты указывают, что сам стимульный материал, невзирая на общую инструкцию “быть оригинальным”, определяет стратегию поиска решения задачи и даже в большей степени, чем ее вербальная или образная природа. Повторяющиеся стимулы (круги или обычный предмет) способствуют, в первую очередь, генерации стереотипных ответов. Поэтому для отказа

от них и продолжения поиска с критической оценкой, всплывающих при поиске идей, требуется такая “преднастройка” фоновой активности мозга, в которой задействованы префронтальные области коры (рис. 2, 3, 4, А). Это состояние характеризуется сочетанием показателей оригинальности и IQ (рис. 1). В условиях тестирования креативности с применением разнообразных стимулов, относящихся к разным семантическим категориям, для успешного выполнения задания предпочтительна стратегия поиска ответа в широко представленной сети ассоциаций, что отражается доминированием диффузно связанных областей задних отделов коры (рис. 3, 4 Б). Повидимому, такую функциональную связность разных регионов коры обеспечивает синхронизация нейронных сетей на частотах Δ - и β -диапазонов: с доминированием префронтальных областей в случае склонности к стратегии критически обусловленного отказа от стереотипа, но темпорально-париетально-окципитальных областей — при задании стимулов, вызывающих актуализацию отдаленных ассоциаций. Можно также отметить, что в последнем случае наблюдается сравнительно больший эффект синхронизации амплитуды Δ - и β_2 -ритма в отведениях правого полушария (T_4, O_2), тогда как в первом случае — левого (Fp_1, F_7). То есть обнаруженный эффект смены полушарной доминантности, связанной с креативностью [20–22], можно объяснить индивидуальными предпочтениями в использовании стратегий “интеллектуальной” или “спонтанной” реализации дивергентного мышления, сопровождающейся

смещением активности в *FPN* и *DMN* при решении задачи [23]. Полученные результаты свидетельствуют о значении фонового состояния *FPN* и *DMN* и хорошо согласуются с данными о разной регионарной ассоциации компонентов креативности: сопротивление фиксации — с лобно-височными областями, а оригинальности — с *DMN* [20].

Под “интеллектуальной” стратегией мы понимаем интернально направляемый поиск ответа, оригинальность которого определяется интеллектуальными способностями (ресурсами знаний и логического мышления), а под “спонтанной” — обеспечение дивергентности мышления вследствие заданного разнообразия стимулов. Успешность дивергентного мышления опосредована включением разных компонентов интеллекта, объединение которых позволяет предсказать около 46% включенных в креативность нейронных сетей [5], а причиной его неуспеха может быть отсутствие желания поиска информации [36].

Согласно литературным данным биопотенциалы Δ -диапазона предлагается рассматривать как индикатор мотивационной составляющей деятельности, модулирующей функциональную активность нейронных сетей [37, 38], тогда как β -активность отражает информационную нагрузку и факторы реорганизации когнитивного контроля посредством функций *FPC* [29, 39, 40]. В таком случае, обнаруженную регионарную специфику корреляционных паттернов этих ритмов в $ГР_{KIQ}$ и $ГР_K$ можно интерпретировать как мотивационную преднастройку гибкой реорганизации селективных процессов для поиска оригинальной идеи: соответственно, с опорой на исполнительный контроль или систему отдаленных семантических ассоциаций.

Следовательно, анализ фоновой ЭЭГ позволяет оценить индивидуальные ресурсы реорганизации структур мозга в зависимости от условий тестирования креативности, требующих, в первую очередь, гибкости мышления или беглости в поиске идей. По-видимому, вследствие суммации таких разных стратегий решения проблемной ситуации наблюдаются разные формы взаимосвязи оригинальности, беглости и гибкости при психометрическом тестировании креативности [41, 42]. Этот факт разных способов достижения результата подчеркивается в модели двойного пути к творчеству: как функции гибкого мышления и настойчивости [43], или связью показателей оригинальности и гибкости не только с разными структурами мозга, но и их разнонаправленными ассоциациями [44, 45]. Таким образом, в качестве одного из факторов отмечаемого разнообразия во взаимодействиях структур мозга при анализе креативности [4, 8–11], следует рассматривать разные условия тестирования, так как наиболее часто и в ЭЭГ-, и фМРТ-исследованиях исполь-

зуются задания: “Необычное использование обычного предмета” или “Незавершенные фигуры” — не только разные по своей природе (вербальное и невербальное, соответственно), но и требующие, как показывают результаты нашей работы, разных стратегий поиска ответа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаруженные частотно-пространственные паттерны Δ - и β_2 -ритмов и их взаимосвязи отражают преднастройку функциональной активности коры для использования разных стратегий поиска оригинальной идеи при тестировании креативности. Сочетание низкочастотных биопотенциалов лобной коры и генерализованно представленной высокочастотной β -активности можно связать со стратегией “интеллектуального” поиска оригинального ответа в условиях давления стереотипного решения. Дифференцированно представленная кластеризация β_2 -активности при ее более диффузно распределенной связи с Δ -ритмом с исключением передне-фронтальных областей отражает поиск решения на основе спонтанных менее контролируемых ассоциаций.

Этические нормы. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированные в Хельсинкской декларации 1984 г. и ее последующими обновлениями, и одобрены локальным этическим комитетом Факультета гуманитарного образования Новосибирского государственного технического университета (Новосибирск).

Информированное согласие. Каждый участник исследования предоставил добровольное письменное информированное согласие, подписанное им после разъяснения потенциальных рисков и преимуществ, а также характера предстоящего исследования.

Благодарности. Автор выражает благодарность А.А. Яшаниной, Е.А. Хорошавцевой и К.Д. Кривоноговой, принимавших участие в регистрации и первичной обработке ЭЭГ, а также в психометрическом тестировании креативности.

Конфликт интересов. Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разумникова О.М. Связь частотно-пространственных параметров фоновой ЭЭГ с уровнем интеллекта и креативности // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2009. Т. 59. № 6. С. 686.
2. Разумникова О.М. Нейрофизиологические механизмы решения экспериментальных творческих задач: инсайт или критический анализ? // Психология. Журн. Высшей школы экономики. 2021. Т. 18. № 3. С. 623.

3. *Beaty R.E., Chen Q., Christensen A.P. et al.* Brain networks of the imaginative mind: Dynamic functional connectivity of default and cognitive control networks relates to openness to experience // *Hum. Brain Mapp.* 2018. V. 39. № 2. P. 811.
4. *Beaty R.E., Benedek M., Silvia P.J., Schacter D.L.* Creative cognition and brain network dynamics // *Trends Cogn. Sci.* 2016. V. 20. № 2. P. 87.
5. *Frith E., Elbich D.B., Christensen A.P. et al.* Intelligence and creativity share a common cognitive and neural basis // *J. Exp. Psychol. Gen.* 2020. V. 150. № 4. P. 609.
6. *Beaty R.E., Benedek M., Wilkins R.W. et al.* Creativity and the default network: A functional connectivity analysis of the creative brain at rest // *Neuropsychologia.* 2014. V. 64. P. 92.
7. *Beaty R.E., Seli P., Schacter D.L.* Network neuroscience of creative cognition: Mapping cognitive mechanisms and individual differences in the creative brain // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019. V. 27. P. 22.
8. *Boccia M., Piccardi L., Palermo L. et al.* Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain-specific creativity // *Front. Psychol.* 2015. V. 6. P. 1195.
9. *Khalil R., Godde B., Karim A.A.* The Link between creativity, cognition, and creative drives and underlying neural mechanisms // *Front. Neural Circuits.* 2019. V. 13. P. 18.
10. *Lin H., Vartanian O.A.* Neuroeconomic framework for creative cognition // *Perspect. Psychol. Sci.* 2018. V. 13. № 6. P. 655.
11. *Ogawa T., Aihara T., Shimokawa T., Yamashita O.* Large-scale brain network associated with creative insight: combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity analyses // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 6477.
12. *Colom R., Karama S., Jung R.E., Haier R.J.* Human intelligence and brain networks // *Dialogues Clin. Neurosci.* 2010. V. 12. № 4. P. 489.
13. *Dubois J., Galdi P., Paul L.K., Adolphs R.* A distributed brain network predicts general intelligence from resting-state human neuroimaging data // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 2018. V. 373. № 1756. P. 20170284.
14. *Langer N., Pedroni A., Gianotti L.R. et al.* Functional brain network efficiency predicts intelligence // *Hum. Brain Mapp.* 2012. V. 33. № 6. P. 1393.
15. *Tadayon E., Pascual-Leone A., Santarnecchi E.* Differential contribution of cortical thickness, surface area, and gyrification to fluid and crystallized intelligence // *Cereb. Cortex.* 2020. V. 30. № 1. P. 215.
16. *Kenett Y.N., Medaglia J.D., Beaty R.E. et al.* Driving the brain towards creativity and intelligence: A network control theory analysis // *Neuropsychologia.* 2018. V. 118. Pt. A. P. 79.
17. *Zhu F., Zhang Q., Qiu J.* Relating inter-individual differences in verbal creative thinking to cerebral structures: an optimal voxel-based morphometry study // *PLoS One.* 2013. V. 8. № 11. P. e79272.
18. *Heinonen J., Numminen J., Hlushchuk Y. et al.* Default Mode and Executive Networks areas: Association with the serial order in divergent thinking // *PLoS One.* 2016. V. 11. № 9. P. e0162234.
19. *Feng Q., He L., Yang W. et al.* Verbal creativity is correlated with the dynamic reconfiguration of brain networks in the resting state // *Front. Psychol.* 2019. V. 10. P. 894.
20. *Hahn J., Kim K.K., Park S.H.* Cortical correlates of creative thinking assessed by the figural Torrance Test of Creative Thinking // *Neuroreport.* 2019. V. 30. № 18. P. 1289.
21. *Mihov K.M., Denzler M., Förster J.* Hemispheric specialization and creative thinking: a meta-analytic review of lateralization of creativity // *Brain Cogn.* 2010. V. 72. № 3. P. 442.
22. *Aziz-Zadeh L., Liew S.L., Dandekar F.* Exploring the neural correlates of visual creativity // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2013. V. 8. № 4. P. 475.
23. *Li W., Yang J., Zhang Q. et al.* The Association between resting functional connectivity and visual creativity // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 25395.
24. *Stevens C.E.J., Zabelina D.L.* Creativity comes in waves: An EEG-focused exploration of the creative brain // *Curr. Opin. Behav. Sci.* 2019. V. 27. P. 154.
25. *Takeuchi H., Taki Y., Hashizume H. et al.* The association between resting functional connectivity and creativity // *Cereb. Cortex.* 2012. V. 22. № 12. P. 2921.
26. *Benedek M., Bergner S., Könen T. et al.* EEG alpha synchronization is related to top-down processing in convergent and divergent thinking // *Neuropsychologia.* 2011. V. 49. № 12. P. 3505.
27. *Benedek M., Jauk E., Sommer M. et al.* Intelligence, creativity, and cognitive control: the common and differential involvement of executive functions in intelligence and creativity // *Intelligence.* 2014. V. 46. P. 73.
28. *Lustenberger C., Boyle M.R., Foulser A.A. et al.* Functional role of frontal alpha oscillations in creativity // *Cortex.* 2015. V. 67. P. 74.
29. *Erickson B., Truelove-Hill M., Oh Y. et al.* Resting-state brain oscillations predict trait-like cognitive styles // *Neuropsychologia.* 2018. V. 120. P. 1.
30. *Kounios J., Fleck J.I., Green D.L. et al.* The origins of insight in resting-state brain activity // *Neuropsychologia.* 2008. V. 46. № 1. P. 281.
31. *Briley P.M., Liddle E.B., Groom M.J. et al.* Development of human electrophysiological brain networks // *J. Neurophysiol.* 2018. V. 120. № 6. P. 3122.
32. *Razumnikova O.M., Krivonogova K.D.* Electroencephalographic correlates of the activity of the frontoparietal system as predictors of verbal intelligence and non-verbal creativity // *Russ. Psychol. J.* 2019. V. 16. № 2/1. P. 45.
33. *Solomon E.A., Kragel J.E., Sperling M.R. et al.* Widespread theta synchrony and high-frequency desynchronization underlies enhanced cognition // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. № 1. P. 1704.
34. *Hacker C.D., Snyder A.Z., Pahwa M. et al.* Frequency-specific electrophysiologic correlates of resting state fMRI networks // *Neuroimage.* 2017. V. 149. P. 446.
35. *Разумникова О.М.* Способы определения креативности. Новосибирск: НГТУ, 2002. 35 с.
36. *Harms M., Reiter-Palmon R., Derrick D.C.* The role of information search in creative problem solving // *Psychol. Aesthet. Creat. Arts.* 2020. V. 14. № 3. P. 367.

37. *Harmony T.* The functional significance of delta oscillations in cognitive processing // *Front. Integr. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 83.
38. *Knyazev G.G.* EEG delta oscillations as a correlate of basic homeostatic and motivational processes // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2012. V. 36. № 1. P. 677.
39. *Rogala J., Kublik E., Krauz R., Wróbel A.* Resting-state EEG activity predicts fronto-parietal network reconfiguration and improved attentional performance // *Sci. Rep.* 2020. V. 10. № 1. P. 5064.
40. *Stoll F.M., Wilson C.R.E., Faraut M.C.M. et al.* The effects of cognitive control and time on frontal beta oscillations // *Cereb. Cortex.* 2016. V. 26. № 4. P. 1715.
41. *Shaw G.A., DeMers S.T.* The relationship of imagery to originality, flexibility and fluency in creative thinking // *J. Ment. Imagery.* 1986. V. 10. № 1. P. 65.
42. *Zabelina D.L., Robinson M.* Creativity as flexible cognitive control // *Psychol. Aesthet. Creat. Arts.* 2010. V. 4. № 3. P. 136.
43. *Nijstad B.A., De Dreu C.K.W., Rietzschel E.F., Baas M.* The dual pathway to creativity model: creative ideation as a function of flexibility and persistence // *Eur. Rev. Soc. Psychol.* 2010. V. 21. P. 34.
44. *Benedek M., Franz F., Heene M., Neubauer A.C.* Differential effects of cognitive inhibition and intelligence on creativity // *Pers. Individ. Dif.* 2012. V. 53. № 4. P. 480.
45. *Chen Q.L., Xu T., Yang W.J. et al.* Individual differences in verbal creative thinking are reflected in the precuneus // *Neuropsychologia.* 2015. V. 75. P. 441.

Fronto-Parietal Patterns of Delta and Beta EEG Oscillations as Correlates of the Conditions of Creativity Testing

O. M. Razumnikova*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*E-mail: razoum@mail.ru

Recently, much attention has been paid to the mechanism of cooperation between the fronto-parietal system and the default system, since their “pre-tuning” at rest and the subsequent dynamics of functional interaction are associated with an individual variety of strategies for performing tasks while creativity testing. To study the EEG correlates of such strategies, we analyzed the regional specificity of Δ - and β -oscillations in the resting-state and compared them with the results of testing of creativity and intelligence in 37 university students (18 ± 1.1 years; 27 women and 10 men). The indicators of originality of responses when testing creativity were calculated using the databases we created earlier for the subtests “Circles”, “Incomplete figures”, “Unusual use of ordinary objects” and an expert assessment of the originality of sentences made up of words belonging to distant semantic categories. The verbal and figurative components of intelligence were assessed according to the Amthauer intelligence structure subtests. Using the cluster analysis of the listed indicators of creativity and intelligence, we identified two groups of study participants: one (GR_{KIQ}) was characterized by a combination of higher values of intelligence and originality of answers in those tasks where it was required to reject stereotypical ideas while limiting the time for their search, and the other (GR_K) – relatively lower intelligence, but high originality of solving the problem in terms of testing creativity with a variety of stimuli and without time limits. These two clusters differed in the regional organization of the power of the Δ - and β_2 -rhythms and in the correlation patterns of these rhythms: GR_{KIQ} is represented by wide-spread high-frequency β -activity and its correlation with low-frequency biopotentials in the frontal cortex whereas GR_K is characterized by cortical mosaic of the β_2 -activity with its diffusely distributed correlations with the Δ -rhythm by the exception of the anterior frontal areas. The detected effects can be considered as a “pre-tuning” to the strategy of “intelligent” search for an original answer under conditions of resistance to fixation on a stereotyped idea in the GR_{KIQ} or a solution based on a spontaneous search for distant associations in the GR_K .

Keywords: creativity, intelligence, EEG, frontal-parietal system, default system, Δ - and β -oscillations.

УДК 612.821

ЭНЦЕФАЛОПАТИЯ НЕДОНОШЕННЫХ ДЕТЕЙ КАК НЕОЧЕВИДНАЯ ПРИЧИНА КОГНИТИВНЫХ И ПОВЕДЕНЧЕСКИХ РАССТРОЙСТВ

© 2023 г. А. Б. Пальчик*

ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
Минздрава РФ, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: xander57@mail.ru

Поступила в редакцию 03.11.2022 г.

После доработки 23.12.2022 г.

Принята к публикации 12.01.2023 г.

Данная статья посвящена относительно новому понятию в педиатрии, неонатологии и неврологии — энцефалопатии недоношенных детей (*Encephalopathy of Prematurity — EoP*). Рассмотрена динамика понимания самого термина “энцефалопатия”. Показано, что данное состояние возникает у недоношенных детей преимущественно в середине беременности и в своих истоках имеет нейровоспаление, нарушение созревания олигодендроцитов, гипомиелинизацию, снижение объема коры головного мозга. *EoP* представляет собой интимное поражение головного мозга недоношенного с вовлечением серого вещества, особенно интернейронов (аксонно-нейронная болезнь), некистозной лейкомаляцией (активация микроглии) с неспецифической манифестацией в неонатальном периоде и развитием когнитивных и поведенческих расстройств в раннем детстве. Представлены возможные механизмы раннего вмешательства, таргетной терапии *EoP* и ее последствий в более старшем возрасте.

Ключевые слова: энцефалопатия, недоношенные дети, нейровоспаление, микроглия, нейрокогнитивные расстройства.

DOI: 10.31857/S013116462370025X, **EDN:** GEUXTA

Общие представления об энцефалопатии

Энцефалопатия — это преходящие и неспецифические поражения мозга невоспалительного генеза (ВОЗ, 1969). Как показано во множестве источников, определение “невоспалительный” генез в настоящее время нельзя считать корректным, поскольку исследования последних двух десятилетий показали важнейшую роль факторов воспаления в развитии энцефалопатии. Наверное, более правильно относить к энцефалопатии преходящие неспецифические поражения мозга “неинфекционного” генеза.

В отношении энцефалопатий в период новорожденности существует несколько определений [1]. Неонатальная энцефалопатия (НЭ) представляет собой клинический (но не этиологически детерминированный) термин, описывающий угнетение сознания новорожденного на момент обследования. НЭ — это клинический синдром, включающий изменение уровня сознания, рефлексов, мышечного тонуса и двигательной активности, судороги, нарушения регуляции дыхания и пищеварения [2].

Гипоксически-ишемическая энцефалопатия (ГИЭ) — термин описывающий энцефалопатию

согласно приведенному выше определению, если доказано, что механизм поражения имеет гипоксическую и/или ишемическую природу [2].

Гипоксически-ишемическая энцефалопатия — также называемая постасфиктическая энцефалопатия, представляет собой подтип НЭ, этиология которой установлена и обусловлена дефицитом кислорода и кровотока в период позже 34 недель гестации. Исторически, множество случаев НЭ расценивалось как ГИЭ, однако эпидемиологические исследования свидетельствуют о некорректности этого [3].

Последнее определение энцефалопатии Американской академии педиатрии постулировало применимость использования термина к детям более 34 недель гестации. Это обусловлено совокупностью коренных преобразований в морфологии и функциях головного мозга плода в этот период, которые способствуют формированию “классической” энцефалопатии новорожденных. К этим изменениям относят обратное развитие герминального матрикса, смену терминального на магистральный тип кровоснабжения мозга, формирование ауторегуляции мозговых артерий (спазм и дилатация артериол) и одинарный ве-

нозный отток в головном мозге, а также созревание олигодендроглии [1, 4].

Понятие энцефалопатии недоношенных

До начала 2010-х гг. применение термина “энцефалопатия” к недоношенным детям считалось некорректным.

Начиная с работы *Volpe J.J.* [5], произошли существенные изменения во взглядах на данную проблему. Основополагающими чертами энцефалопатии недоношенных детей (*Encephalopathy of Prematurity – EoP*) являются нейровоспаление, нарушение созревания олигодендроцитов, гипомиелинизация, снижение фракционной анизотропии и объема коры головного мозга по данным магнитно-резонансной томографии (МРТ) и формирование со временем значительного когнитивного дефекта [5, 6].

Механизмы развития энцефалопатии недоношенных

Среди причин возникновения *EoP* отмечают отслойку нормально расположенной плаценты, фето-фетальную трансфузию, преэклампсию, патологию плаценты (с возможным развитием гипоксически-ишемического поражения мозга плода и/или задержки внутриутробного развития) и, в меньшей степени, маловодие и употребление матерью токсических средств [7].

Признаки воспаления у матери и плода считают более актуальным фактором риска развития *EoP*, чем гипоксию/ишемию и даже при отсутствии клинической манифестации воспаление ассоциировано с дальнейшими неврологическими, когнитивными и поведенческими расстройствами [8–11].

Необходимо отметить, что относительную, по сравнению с внутриутробной, внеутробную гипероксию (а не гипоксию) рассматривают как возможную причину *EoP* [12].

Сопоставление этапов формирования бронхопульмонального дерева и головного мозга на ранних этапах онтогенеза показывают определенную сопряженность этих процессов и дают основания для принятия обоснованности предыдущего предположения, а также выдвижения концепции о существовании оси: “легкое–мозг” [13].

Вопрос о специфичности механизмов развития *EoP* остается открытым. Среди клеточных звеньев патогенеза этого состояния указывают на прямое действие факторов воспаления на эндотелиальные клетки гематоэнцефалического барьера, стимуляцию рецепторов цитокинов (в частности, интерлейкина-1), продукцию провоспалительных молекул эндотелиальными клетками паренхимы мозга [6].

Процесс воспаления оказывает противоречивое действие на развитие мозга плода, уменьшая нейрогенез в эмбриональных пролиферативных зонах и увеличивая его в субвентрикулярной зоне и зубчатой извилине [14, 15].

Особое место в развитии *EoP* принадлежит микроглии. Ее роль в формировании поражения мозга противоречива: с одной стороны, микроглия оказывает нейропротективное действие при перинатальном поражении мозга (микроглия 2 – М2); с другой стороны – она принимает участие в разворачивании повреждения развивающегося мозга (микроглия 1 – М1). Модуляторы церебрального клеточного поражения (в частности, гипоксия/ишемия) высвобождают ассоциированные с повреждением белки-посредники (damage-associated messenger proteins – DAMPS), а также токсические метаболиты, прямо активирующие микроглию [16–20].

Обнаруживаемый при ряде поражений белого мозгового вещества у недоношенных реактивный астроглиоз ассоциирован с повреждающим действием избыточной продукции гиалуроновой кислоты, костного морфогенетического белка, циклооксигеназы-2, простагландина Е2, эндотелина-1, которые повреждают созревание предшественников олигодендроцитов [6].

Своеобразием *EoP* является поражение серого мозгового вещества. Среди основных форм этого повреждения необходимо упомянуть уменьшение количества нейронов с увеличением их гибели, особое страдание субпопуляции интернейронов, незрелость ламинации мозжечка. Описан комплекс легких изменений в интернейронах, которые чаще встречаются в случаях с некистозным поражением белого мозгового вещества, чем в группе контроля, и у глубоко недоношенных детей, чем у недоношенных более высоких сроков гестации [21].

По мнению *B. Fleiss et al.* [6], *EoP* относится к синаптопатиям, т.е. болезням, в основе которых лежит дисфункция синапсов. Это дисфункция может быть обусловлена мутацией гена, кодирующего синаптически-зависимый белок, ионный канал, нейротрансмиттерный рецептор или белок, вовлеченный в высвобождение нейротрансмиттера. Помимо этого синаптопатия может возникнуть вследствие недостатка арборизации аксонов и дендритов и, соответственно, синаптогенеза. Указанные выше изменения в сером веществе головного мозга при *EoP*, различные варианты роста мозга и особенности складчатости мозга (формирование борозд и извилин) являются следствием микроструктурного дефицита и нарушения взаимосвязей [22–24]. Нарушение образования борозд и извилин обусловлено множественными возраст-специфическими микроструктурными про-

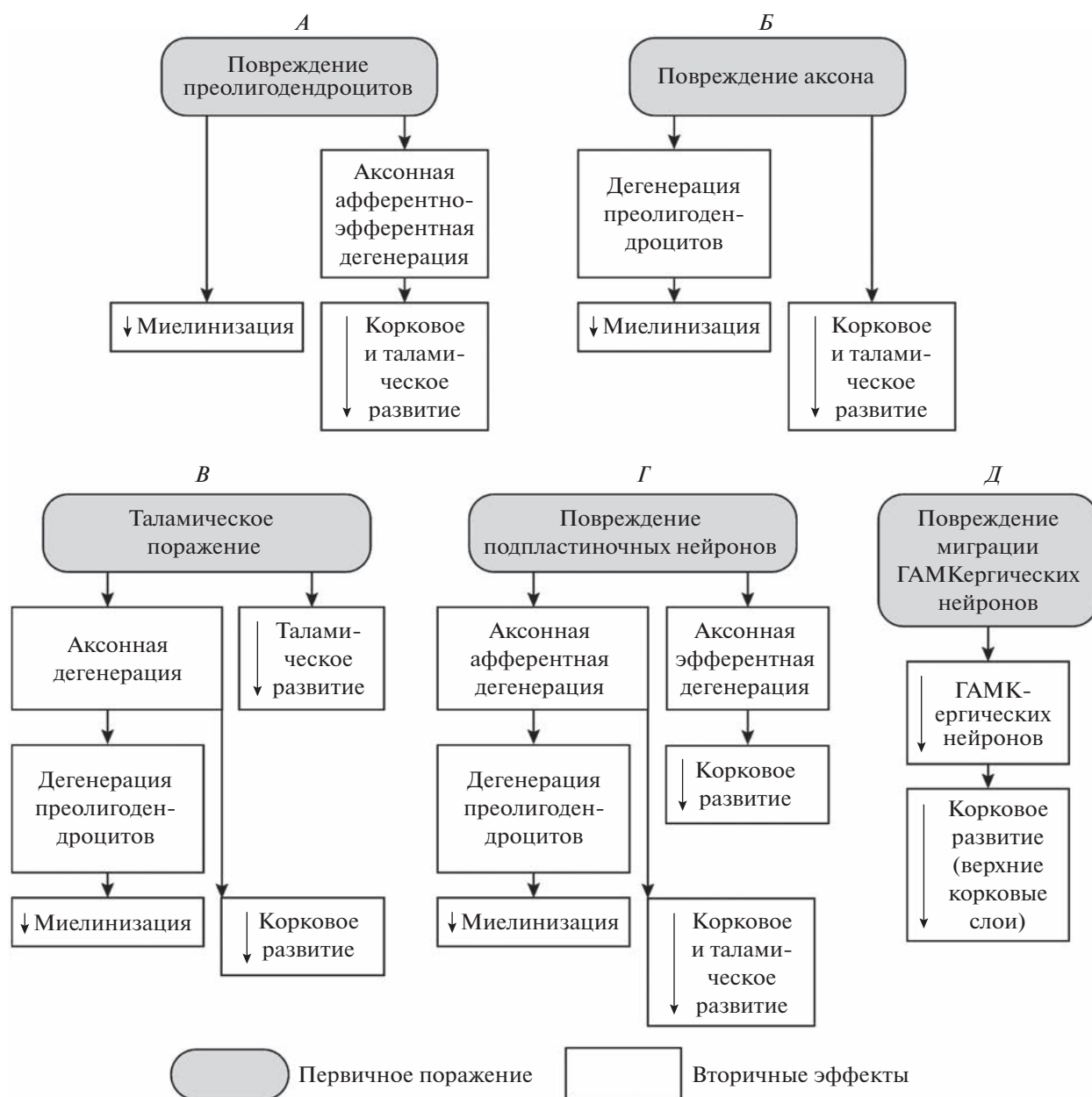


Рис. 1. 5 сценариев развития *EoP* (Volpe J.J. [5]).

цессами: нейрогенезом, тангенциальной миграцией, нейронной арборизацией [25–27].

EoP, по мнению J.J. Volpe [5], представляет комбинацию деструктивных поражений и нарушений развития. Нарушения развития включают в себя изменения в межклеточных взаимодействиях с вовлечением межклеточных трофических факторов, ретроградных эффектов и антеградных эффектов (валлеровская дегенерация, транссинаптическая дегенерация) и т.д. В настоящее время разработаны 5 сценариев взаимоот-

ношения первичных деструктивных поражений и вторичных нарушений развития (рис. 1).

Поскольку *EoP* – это вновь выделенное понятие, за которым скрывается ряд расстройств (в частности, некистозная перивентрикулярная лейкомаляция (ПВЛ); аксонно-нейронная болезнь и т.д.), то клиническая картина *EoP* периода новорожденности и грудного возраста не является специфичной и представлена в ряде руководств [4, 28, 29]. Реализация *EoP* своеобразна и в более поздних, дошкольном и школьном, возрастах.

Нейровизуализация и электрографические корреляты при энцефалопатии недоношенных

Сочетанные исследования диффузно-взвешенной и функциональной МРТ показывают нарушения интеграции нейронных сетей при *ЕоР*, в частности кортико-кортикальных и кортико-субкортикальных. Снижение взаимосвязей в этих сетях ассоциировано с нарушением двигательной, исполнительской, речевой и когнитивной функций [30–32].

Исследования показывают связь между развитием коры головного мозга (объемом мозга и площадью коры) между 20 и 40 неделями гестации у недоношенных детей и нейрокогнитивными функциями у этих младенцев в 2 года и 6 лет. В большей степени нарушение роста коры коррелирует с расстройствами исполнительских функций, способности к обучению, памяти, внимания и социальной адаптации. Между тем, не выявлено связи между размерами коркового вещества и двигательной функцией [33].

Электроэнцефалография (ЭЭГ) является методом функционального мониторинга *ЕоР* и прогнозирования ее исходов. Спонтанная транзиторная активность на ЭЭГ как в случаях наличия перинатальных кровоизлияний (ПИВК), так и без них, ассоциирована с развитием серого мозгового вещества, индекса гирификации (складчатости) и увеличением фракционной анизотропии в белом мозговом веществе [34].

Как показано *K. Whitehead et al.* [35], при грубых структурных поражениях мозга нарушается процесс подкрепления сигнала в корковых сетях, что формирует изменения на ЭЭГ и при выявлении подобного от недели до месяца после рождения служит прогностическим признаком развития задержек развития и детского церебрального паралича к 18–24 месяцам.

Между тем, в ряде работ показано отсутствие взаимосвязей между характером поражения мозга и показателями ЭЭГ [36, 37]. *J. Mordel et al.* [38] предполагают, что нарушения биоэлектрической активности коры головного мозга формируется в первые недели после повреждения и затем нивелируется ко взрослому возрасту.

Энцефалопатия недоношенных и болезни развития

Установлено, что *ЕоР* повышает риск возникновения болезней развития таких, как расстройства аутистического спектра в 17 раз, синдрома дефицита внимания и гиперактивности в 2.5 раза, эпилепсии в 5 раз, а также снижения интеллекта пропорционально степени недоношенности [6].

Поскольку данные расстройства возникают у детей, родившихся доношенными, то крайне важным становится вопрос об особенностях течения этих заболеваний у младенцев с *ЕоР*. Как по-

казано, внешние проявления нейрокогнитивных и поведенческих расстройств у детей, рожденных доношенными и с *ЕоР* мало отличимы. Однако, если у родившихся доношенными мальчиков синдром дефицита внимания и гиперактивности встречается существенно чаще, чем у доношенных девочек; то подобного различия у детей, родившихся недоношенными, нет. При формировании расстройств аутистического спектра у недоношенных мальчиков (которые составляют подавляющее большинство этих больных) характерна коморбидность с ночными апноэ, судорожными припадками и синдромом дефицита внимания и гиперактивности; у девочек — с невербальными расстройствами [39, 40].

Связь *ЕоР* с болезнями развития проходит по нескольким направлениям [6]: 1) поражение серого мозгового вещества в зонах, ответственных за тормозные процессы (для синдрома дефицита внимания и гиперактивности) и социальную адаптацию (для расстройств аутистического спектра); 2) поражение интернейронов; 3) поражение синапсов (синаптопатии); 4) генетические механизмы (в частности, полиморфизм гена PSD95); 5) нейровоспаление.

Перспективы лечения энцефалопатии недоношенных

Лечение *ЕоР* мало специфично, имеет много общего с лечением ПИВК и ПВЛ, основные его этапы представлены в предыдущей главе. Среди методов воздействия на поражение непосредственно серого мозгового вещества *B. Fleiss et al.* [6] выделяют сульфат магнесии и эритропоэтин.

Наряду с этим рассматривают возможности целенаправленной терапии *ЕоР*. Мидкайн (*Midkine* — МК) представляет собой маленький по размеру гепарин-связанный белок. Название его происходит от цитокина (*cytokine*) и середины беременности (*mid-gestation*), поскольку именно в этот период происходит его максимальная экспрессия. Экспрессия МК регулируется ретиноевой кислотой — дериватом витамина А. Секретция его высока в период эмбрионально-фетального развития. Вступая во взаимосвязь с рецепторами клеточной мембраны, МК способствует пролиферации, миграции и дифференциации клеток. Показано, что МК обладает нейропротективным и нейрорегенеративным действием. Его эффективность отмечена при ишемическом поражении мозга, припадках и аддитивных расстройствах [41–43]. Сферами приложения МК при *ЕоР* являются микроглиоз, астроглиоз (до 23 недели гестации), нарушение созревания и гибель олигодендроцитов, гибель нейрона и, возможно, нарушение созревания интернейронов [44]. Временное взаимоотношение основных перинатальных по-

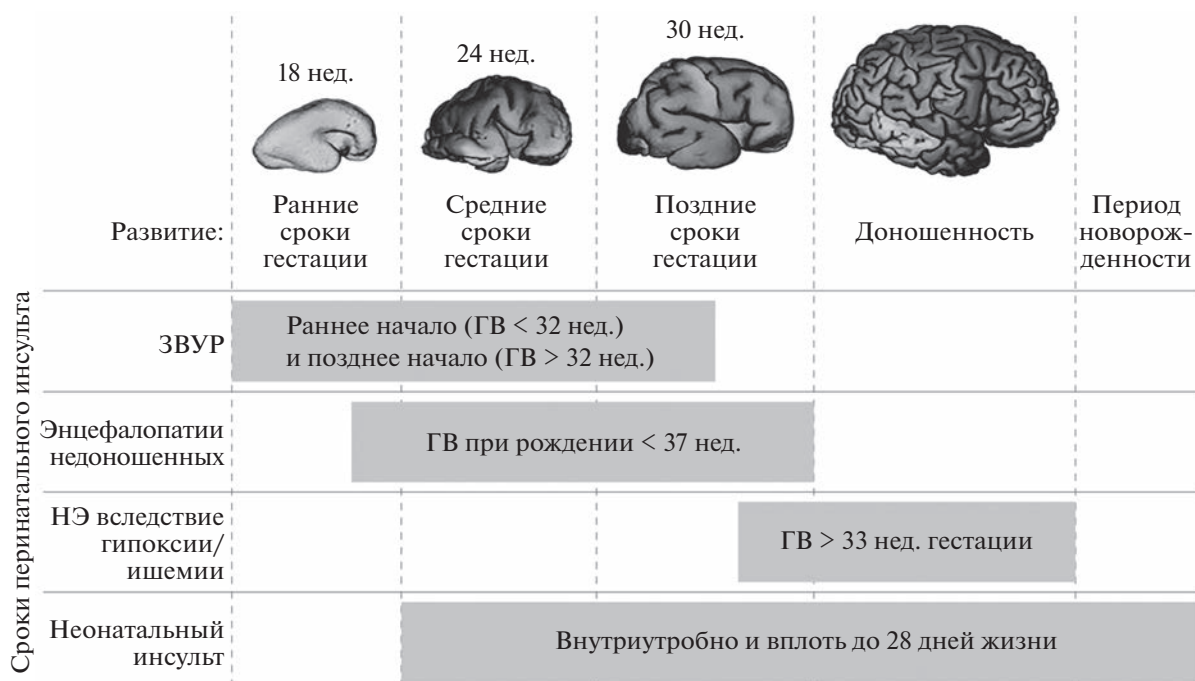


Рис. 2. Временное взаимоотношение основных перинатальных поражений мозга и этапов его развития [45]. ГВ – гестационный возраст. НЭ – неонатальная энцефалопатия.

ражений мозга, этапы его развития [45], представлены на рис. 2.

Эпохальное, по мнению *J.J. Volpe* [46], открытие *T. Hammond et al.* [47], касающееся маргинальных свойств микроглии (M1 и M2) и наличия, по крайней мере, 9 переходных ее форм, открывает возможность терапии, направленную на “переобучение” нейродеструктивной в нейропротективную формы микроглии.

Идентифицированы отличительные микроРНК в этих клетках (микроРНК – короткие некодирующие молекулы РНК), участвующих в регуляции экспрессии генов. Выявлены различные фармакологические агенты, которые могут имитировать или снижать экспрессию эндогенных микроРНК. Внутривенное введение конкретного микроРНК (miR-124) способствует изменению микроглии из воспалительного к противовоспалительному фенотипу (M1 → M2) и способствует нейрогенезу [48, 49].

Вмешательства, направленные на преобразование микроглии головного мозга от провоспалительного к противовоспалительному фенотипу изучены на различных экспериментальных моделях. Иммуномодуляторы, проникающие через гематоэнцефалический барьер (миноциклин, мелатонин), предполагают противовоспалительный эффект, однако их безопасность и эффективность применения не установлены [50, 51].

Другим перспективным направлением лечения *EoP* недоношенных считают введение мезен-

химальных клеток (МСК). Интраназальные введенные мезенхимальные стволовые клетки (МСК) диффузно проникают в поврежденный мозг, улучшая миелинизацию, снижая церебральное воспаление и восстанавливая созревание олигодендроглии при диффузном поражении белого мозгового вещества. МСК активирует инсулиноподобный фактор роста IGF1, эпидермальный фактор роста EGF, интерлейкин IL 11, которые, в свою очередь, стимулируют созревание олигодендроцитов [52]. МСК и IGF1 в эксперименте способствуют развитию и/или восстановлению связей между нейронами [53].

Потенциальное терапевтическое вмешательство при последствиях *EoP* зависит от характера развившихся расстройств. Фармакологическая стратегия при синдроме дефицита внимания направлена на нормализацию синаптической передачи; при расстройствах аутистического спектра – на преодоление антагонизма серотониновых и дофаминовых рецепторов. Однако это малоэффективно при нарушениях социализации. В таких случаях, равно как и при проблемах в обучении (дислексия, дискалькулия) [54].

К средствам, рассматриваемым как возможные корректоры расстройств аутистического спектра, относят модуляторы ГАМК/глутаматовых рецепторов, нейропептиды, иммуномодуляторы, диетотерапию [55, 56].

Наряду с этим обсуждается лечение расстройств аутистического спектра и других болезней разви-

тия воздействием на “кишечно-мозговую ось” [57, 58].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные данные позволяют утверждать, что энцефалопатия недоношенных (*ЕоР*) представляет собой интимное поражение головного мозга недоношенного с вовлечением серого вещества, особенно интернейронов (аксонно-нейронная болезнь), некистозной лейкомаляцией (активация микроглии) с неспецифической манифестацией в неонатальном периоде и развитием когнитивных и поведенческих расстройств в раннем детстве.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пальчик А.Б., Шабалов Н.П. Гипоксически-ишемическая энцефалопатия новорожденных. М.: МЕДпресс-информ, 2020. 302 с.
2. Principles and Practice of Child Neurology in Infancy / Ed. Kennedy C. London: MacKeith Press, 2012. 362 p.
3. Neonatal Encephalopathy and Cerebral Palsy (Defining the Pathogenesis and Pathophysiology). Washington, American College of Obstetricians and Gynecologists, 2003. 94 p.
4. Volpe J.J. Neurology of the Newborn. Philadelphia: Saunders, 2008. 1094 p.
5. Volpe J.J. The encephalopathy of prematurity—brain injury and impaired brain development inextricably intertwined // Semin. Pediatr. Neurol. 2009. V. 16. № 4. P. 167.
6. Fleiss B., Gressens P., Stolp H.B. Cortical Gray Matter Injury in Encephalopathy of Prematurity: Link to Neurodevelopmental Disorders // Front. Neurol. 2020. V. 11. P. 575.
7. Ananth C.V., Vintzileos A.M. Medically indicated preterm birth: recognizing the importance of the problem // Clin. Perinatol. 2008. V. 35. № 1. P. 53.
8. Dammann O., Leviton A. Maternal intrauterine infection, cytokines, and brain damage in the preterm newborn // Pediatr. Res. 1997. V. 42. № 1. P. 1.
9. Hagberg H., Mallard C., Ferriero D.M. et al. The role of inflammation in perinatal brain injury // Nat. Rev. Neurol. 2015. V. 11. № 4. P. 192.
10. Kuban K.C., O'Shea T.M., Allred E.N. et al. The breadth and type of systemic inflammation and the risk of adverse neurological outcomes in extremely low gestation newborns // Pediatr. Neurol. 2015. V. 52. № 1. P. 42.
11. Lau J., Magee F., Qiu Z. et al. Chorioamnionitis with a fetal inflammatory response is associated with higher neonatal mortality, morbidity, and resource use than chorioamnionitis displaying a maternal inflammatory response only // Am. J. Obstet. Gynecol. 2005. V. 193. № 3. Pt. 1. P. 708.
12. Manley B.J., Owen L.S., Hooper S.B. et al. Towards evidence-based resuscitation of the newborn infant // Lancet. 2017. V. 389. № 10079. P. 1639.
13. Obst S., Herz J., Alcazar M.A.A. et al. Perinatal Hyperoxia and Developmental Consequences on the Lung-Brain Axis // Oxid. Med. Cell. Longev. 2022. V. 2022. P. 5784146.
14. Pang Y., Dai X., Roller A. et al. Early postnatal lipopolysaccharide exposure leads to enhanced neurogenesis and impaired communicative functions in rats // PLoS One. 2016. V. 11. № 10. P. e0164403.
15. Stolp H.B., Turnquist C., Dziegielewska K.M. et al. Reduced ventricular proliferation in the foetal cortex following maternal inflammation in the mouse // Brain. 2011. V. 134. Pt. 11. P. 3236.
16. Dommergues M.A., Plaisant F., Verney C., Gressens P. Early microglial activation following neonatal excitotoxic brain damage in mice: a potential target for neuroprotection // Neuroscience. 2003. V. 121. № 3. P. 619.
17. Faustino J.V., Wang X., Johnson C.E. et al. Microglial cells contribute to endogenous brain defenses after acute neonatal focal stroke // J. Neurosci. 2011. V. 31. № 36. P. 12992.
18. Fernández-López D., Faustino J., Klibanov A.L. et al. Microglial cells prevent hemorrhage in neonatal focal arterial stroke // J. Neurosci. 2016. V. 36. № 10. P. 2881.
19. Lafemina M.J., Sheldon R.A., Ferriero D.M. Acute hypoxia-ischemia results in hydrogen peroxide accumulation in neonatal but not adult mouse brain // Pediatr. Res. 2006. V. 59. № 5. P. 680.
20. Van Steenwinckel J., Schang A.L., Krishnan M.L. et al. Decreased microglial Wnt/β-catenin signalling drives microglial pro-inflammatory activation in the developing brain // Brain. 2019. V. 142. № 12. P. 3806.
21. Stolp H.B., Fleiss B., Arai Y. et al. Interneuron Development is disrupted in preterm brains with diffuse white matter injury: observations in mouse and human // Front. Physiol. 2019. V. 10. P. 955.
22. Ball G., Srinivasan L., Aljabar P. et al. Development of cortical microstructure in the preterm human brain // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2013. V. 110. № 23. P. 9541.
23. Ball G., Boardman J.P., Aljabar P. et al. The influence of preterm birth on the developing thalamocortical connectome // Cortex. 2013. V. 49. № 6. P. 1711.
24. Pandit A.S., Robinson E., Aljabar P. et al. Whole-brain mapping of structural connectivity in infants reveals altered connection strength associated with growth and preterm birth // Cereb. Cortex. 2014. V. 24. № 9. P. 2324.
25. Bayly P.V., Taber L.A., Kroenke C.D. Mechanical forces in cerebral cortical folding: a review of measurements and models // J. Mech. Behav. Biomed. Mater. 2014. V. 29. P. 568.
26. Llinares-Benadero C., Borrell V. Deconstructing cortical folding: genetic, cellular and mechanical determinants // Nat. Rev. Neurosci. 2019. V. 20. № 3. P. 161.
27. Striedter G.F., Srinivasan S., Monuki E.S. Cortical folding: when, where, how, and why // Annu. Rev. Neurosci. 2015. V. 38. P. 291.
28. Пальчик А.Б., Понятишин А.Е., Федорова Л.А. Неврология недоношенных детей. М.: МЕДпресс-информ, 2021. 405 с.

29. Гузева В.И., Пальчик А.Б., Понятишин А.Е. и др. Гипоксические поражения головного мозга у недоношенных новорожденных. Федеральное руководство по детской неврологии (под ред. В.И. Гузевой). М.: ООО "МК", 2016. С. 42.
30. Ball G., Aljabar P., Arichi T. et al. Machine-learning to characterise neonatal functional connectivity in the preterm brain // *Neuroimage*. 2016. V. 124. Pt. A. P. 267.
31. Bouyssy-Kobar M., De Asis-Cruz J., Murnick J. et al. Altered functional brain network integration, segregation, and modularity in infants born very preterm at term-equivalent age // *J. Pediatr*. 2019. V. 213. P. 13.
32. Gozdas E., Parikh N.A., Merhar S.L. et al. Altered functional network connectivity in preterm infants: antecedents of cognitive and motor impairments? // *Brain Struct. Funct.* 2018. V. 223. № 8. P. 3665.
33. Rathbone R., Counsell S.J., Kapellou O. et al. Perinatal cortical growth and childhood neurocognitive abilities // *Neurology*. 2011. V. 77. № 16. P. 1510.
34. Tataranno M.L., Claessens N.H.P., Moeskops P. et al. Changes in brain morphology and microstructure in relation to early brain activity in extremely preterm infants // *Pediatr. Res.* 2018. V. 83. № 4. P. 834.
35. Whitehead K., Jones L., Laudiano-Dray M.P. et al. Altered cortical processing of somatosensory input in preterm infants who had high-grade germinal matrix-intraventricular haemorrhage // *Neuroimage Clin.* 2020. V. 25. P. 102095.
36. Galinsky R., Draghi V., Wassink G. et al. Magnesium sulfate reduces EEG activity but is not neuroprotective after asphyxia in preterm fetal sheep // *J. Cereb. Blood Flow Metab.* 2017. V. 37. № 4. P. 1362.
37. van de Looij Y., Chatagner A., Quairiaux C. et al. Multimodal assessment of long-term erythropoietin treatment after neonatal hypoxic-ischemic injury in rat brain // *PLoS One*. 2014. V. 9. № 4. P. e95643.
38. Mordel J., Sheikh A., Tsohataridis S. et al. Mild systemic inflammation and moderate hypoxia transiently alter neuronal excitability in mouse somatosensory cortex // *Neurobiol. Dis.* 2016. V. 88. P. 29.
39. Bowers K., Wink L.K., Pottenger A. et al. Phenotypic differences in individuals with autism spectrum disorder born preterm and at term gestation // *Autism*. 2015. V. 19. № 6. P. 758.
40. Elgen I., Sommerfelt K., Markestad T. Population based, controlled study of behavioural problems and psychiatric disorders in low birthweight children at 11 years of age // *Arch. Dis. Child. Fetal Neonatal Ed.* 2002. V. 87. № 2. P. F128.
41. Herradón G., Pérez-García C. Targeting midkine and pleiotrophin signalling pathways in addiction and neurodegenerative disorders: recent progress and perspectives // *Br. J. Pharmacol.* 2014. V. 171. № 4. P. 837.
42. Kim Y.B., Ryu J.K., Lee H.J. et al. Midkine, heparin-binding growth factor, blocks kainic acid-induced seizure and neuronal cell death in mouse hippocampus // *BMC Neurosci.* 2010. V. 11. P. 42.
43. Takada J., Ooboshi H., Ago T. et al. Postischemic gene transfer of midkine, a neurotrophic factor, protects against focal brain ischemia // *Gene Ther.* 2005. V. 12. № 6. P. 487.
44. Ross-Munro E., Kwa F., Kreiner J. et al. Midkine: The Who, What, Where, and When of a Promising Neurotrophic Therapy for Perinatal Brain Injury // *Front. Neurol.* 2020. V. 11. P. 568814.
45. Vasung L., Lepage C., Radoš M. et al. Quantitative and qualitative analysis of transient fetal compartments during prenatal human brain development // *Front. Neuroanat.* 2016. V. 10. P. 11.
46. Volpe J.J. Microglia: Newly discovered complexity could lead to targeted therapy for neonatal white matter injury and dysmaturation // *J. Neonatal-Perinatal Med.* 2019. V. 12. № 3. P. 239.
47. Hammond T.R., Robinton D., Stevens B. Microglia and the brain: Complementary partners in development and disease // *Annu. Rev. Cell. Dev. Biol.* 2018. V. 34. P. 523.
48. Ponnusamy V., Yip P.K. The role of microRNAs in newborn brain development and hypoxic ischaemic encephalopathy // *Neuropharmacology*. 2019. V. 149. P. 55.
49. Yang Y., Ye Y., Kong C. et al. MiR-124 Enriched exosomes promoted the M2 polarization of microglia and enhanced hippocampus neurogenesis after traumatic brain injury by inhibiting TLR4 pathway // *Neurochem. Res.* 2019. V. 44. № 4. P. 811.
50. Miron V.E., Boyd A., Zhao J.W. et al. M2 microglia and macrophages drive oligodendrocyte differentiation during CNS remyelination // *Nat. Neurosci.* 2013. V. 16. № 9. P. 1211.
51. Biran V., Phan Duy A., Decobert F. et al. Is melatonin ready to be used in preterm infants as a neuroprotectant? // *Dev. Med. Child. Neurol.* 2014. V. 56. № 8. P. 717.
52. Vaes J.E.G., van Kammen C.M., Trayford C. et al. Intranasal mesenchymal stem cell therapy to boost myelination after encephalopathy of prematurity // *Glia*. 2021. V. 69. № 3. P. 655.
53. Vaes J.E.G., Kosmeijer C.M., Kaal M. et al. Regenerative Therapies to Restore Interneuron Disturbances in Experimental Models of Encephalopathy of Prematurity // *Int. J. Mol. Sci.* 2020. V. 22. № 1. P. 211.
54. Heylen S.L., Gelders Y.G. Risperidone, a new antipsychotic with serotonin 5-HT₂ and dopamine D₂ antagonistic properties // *Clin. Neuropharmacol.* 1992. V. 15. Suppl 1. Pt. A. P. 180A.
55. Mattingly G.W., Wilson J., Rostain A.L. A clinician's guide to ADHD treatment options // *Postgrad. Med.* 2017. V. 129. № 7. P. 657.
56. Hong M.P., Erickson C.A. Investigational drugs in early-stage clinical trials for autism spectrum disorder // *Expert Opin. Investig. Drugs*. 2019. V. 28. № 8. P. 709.
57. Hill-Yardin E.L., McKeown S.J., Novarino G., Grabrucker A.M. Extracerebral dysfunction in animal models of autism spectrum disorder // *Adv. Anat. Embryol. Cell Biol.* 2017. V. 224. P. 159.
58. Iannone L.F., Gomez-Eguilaz M., Citaro R., Russo E. The potential role of interventions impacting on gut-microbiota in epilepsy // *Expert Rev. Clin. Pharmacol.* 2020. V. 13. № 4. P. 423.

Encephalopathy of Prematurity: Invisible Cause of the Cognitive and Behavioural Disorders

A. B. Palchik*

Saint-Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health Care of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

**E-mail: xander57@mail.ru*

The article explores a relatively new concept in pediatrics, neonatology and neurology – encephalopathy of prematurity (EoP). The development of understanding of the term “encephalopathy” itself is considered. It is shown that the state occurs in premature babies predominantly in the middle of pregnancy, and may be caused by neuroinflammation, impaired oligodendrocytes maturation, hypomyelination, cerebral cortex volume reduction. EoP represents a sophisticated brain damage in a preterm baby involving gray matter, especially interneurons (axonal-neuronal disease), non-cystic leukomalacia (microglia activation) with nonspecific manifestation in neonatal period, and cognitive and behavioral disorders in early childhood. Possible mechanisms of early intervention, EoP targeted therapy, and its consequences in later childhood are discussed.

Keywords: encephalopathy, prematurity, neuroinflammation, microglia, neurocognitive disorders.

Х ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ “ЦЕНТРАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ РЕЧИ”, ПОСВЯЩЕННАЯ ПАМЯТИ ПРОФЕССОРА Н.Н. ТРАУГОТТ

© 2023 г. Е. И. Гальперина^{1, 2, *}

¹ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии
имени И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

²ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет
Минздрава России, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: galperina-e@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.11.2022 г.

После доработки 20.12.2022 г.

Принята к публикации 12.01.2023 г.

DOI: 10.31857/S0131164623700248, EDN: GADQEA

24–26 октября 2022 г. в Санкт-Петербурге прошла юбилейная X Всероссийская научная конференция (с международным участием) “Центральные механизмы речи”, посвященная памяти проф. Н.Н. Трауготт. Конференция входит в перечень мероприятий Десятилетия науки и технологий Российской Федерации. Организаторами конференции выступали: Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, ЧОУ ДПО “Логопед-Профи” и Российский Государственный педагогический университет им. А.И. Герцена. Данная конференция проходит уже 30 лет, она была изначально задумана и организована проф. Н.Н. Трауготт как площадка для междисциплинарного обсуждения проблем организации речи. Работы проф. Н.Н. Трауготт в области исследования сенсорной и моторной алалии, алексии, теоретического обоснования терапии этих заболеваний по праву относятся к золотому стандарту исследований в данной области. Н.Н. Трауготт была практиком, ее тесное взаимодействие с логопедами при решении клинических задач и критический анализ результатов лечения вели к поиску новых приемов и методов восстановления нарушенных речевых функций.

2022 г. был не случайно выбран для проведения X юбилейной конференции. Праздновалось 140-летие академика Л.А. Орбели, основателя Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова, где Н.Н. Трауготт заведовала лабораторией патологии высшей нервной деятельности. А также 110-летний юбилей А.Р. Лурия, классика нейропсихологии, с которым Н.Н. Трауготт также сотрудничала и считала себя его ученицей. В этом же году должен был праздноваться

еще один юбилей — 90-летие проф. Александра Николаевича Шеповальникова, который стоял у истоков данной конференции и после смерти Натальи Николаевны бессменно возглавлял Оргкомитет конференции. К сожалению, А.Н. Шеповальников покинул нас в 2021 г., его памяти была посвящена секция Психофизиологии речи на X конференции.

Впервые конференция “Центральные механизмы речи” была проведена в 1992 г. при активном и непосредственном участии проф. Н.Н. Трауготт на базе Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, ее формат был научно-практический, конференция была посвящена 80-летию А.Р. Лурия. Выбранный формат — площадка для обсуждения практических задач и современных научных разработок, нашел своих поклонников среди специалистов из различных областей, связанных с изучением, коррекцией и развитием речевой функции, и Конференция стала регулярной.

В нынешней конференции “Центральные механизмы речи” приняло участие более 1000 чел., из них около 500 очно. Было проведено 12 пленарных лекций, организовано 15 симпозиумов по различным тематикам, выступило 179 докладчиков с устными и стендовыми докладами. На Конференции обсуждались проблемы раннего речевого развития, письменной речи, билингвизма, ассистивных технологий при нарушениях коммуникации, онлайн обучения, нарушений речи при коморбидной патологии, очаговых поражениях мозга. В рамках Конференции был проведен Круглый стол по проблеме дифференциальной диагностики речевых нарушений в детском возрасте. Отличительной особенностью X юбилей-

ной Конференции стало проведение отдельной студенческой секции. Лучшие студенческие доклады были отмечены специальной комиссией и награждены памятными подарками и сертификатом для обучения на образовательном портале “Логопед-Профи”.

На Конференции обсуждались проблемы современного состояния исследований в области развития устной и письменной речи в норме и при различных видах нарушений у детей как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения трансляции результатов этих исследований в практику. Также внимание было уделено медицинским аспектам заболеваний, сопутствующих речевым нарушениям, а именно очаговым поражениям мозга у взрослых, психопатологии, нарушениям слуха, дисфагиям и др. Были также подняты проблемы регуляции юридических обоснований особенностей обучения детей с ОВЗ, с дислексией, с РАС и др., а также пути устранения барьеров в сотрудничестве исследователей и практиков. Тезисы докладов опубликованы в сборнике материалов конференции, часть тем подробнее будет раскрыта в статьях специального номера журнала “Специальное образование”. Часть работ физиологической тематики представлена в данном номере журнала “Физиология человека”.

Глубокие вопросы, затрагивающие широкий спектр проблем и нашедшие отклик у специалистов разных профилей, были затронуты в пленарных лекциях. В лекции член-корр. РАО, проф. Т.В. Черниговской “Язык и мозг: смыслы или схемы?” были поставлены кардинальные философские вопросы, связанные не только с изучением мозгового обеспечения языка, но и с обсуждением подходов к изучению когнитивных функций и их “обслуживанию” мозгом. Сложностям формирования навыка чтения и понимания прочитанного, явлению функциональной безграмотности и ее истокам, нарушениям чтения и их биологическим предпосылкам были посвящены лекции акад. РАО, проф. М.М. Безруких, проф. Е.Л. Григоренко и проф. А.Н. Корнева. Отдельная лекция была посвящена памяти проф. Н.Н. Трауготт, ее подготовила ученица Трауготт, бессменный организатор конференции М.Г. Храковская. Проф. МГУ В.А. Дубынин рассказал о новейших исследованиях в области генетики речевых расстройств, а роль проводящих путей мозга для обеспечения языковых функций в норме и их особенностях при патологии, раскрыла д. ф. н. О.В. Драгой. Особенное внимание на конференции было уделено развитию речевых функций в онтогенезе. Проф. А.Б. Пальчик рассказывал об энцефалопатии недоношенных детей, это заболевание может быть источником последующих нарушений ребенка, в том числе и речевых, член-корр. РАО, проф. Р.И. Мачинская рассказала о формировании управляющих функций мозга у дошкольников

и младших школьников, проф. Ю.Ю. Штыров осветил вопросы вербального научения у детей с точки зрения нейрофизиологии и нейромодуляционного воздействия.

Темы некоторых пленарных докладов получили развитие на секциях. Так, лекция проф. О.С. Орловой была посвящена стратегическим направлениям междисциплинарного развития логопедии. Эти вопросы также рассматривались и на секции под председательством проф. Т.Б. Филичевой и Т.В. Тумановой, организованной Союзом дефектологов России. В докладе д. филол. н. Ю.В. Норманской и на секции, посвященной проблемам билингвизма, рассматривались особенности речи билингвов и их обучение с помощью современных компьютерных технологий. Вопросы, затронутые в лекциях проф. М.М. Безруких, Е.Л. Григоренко и А.Н. Корнева, подробно обсуждались в секции “Письменная речь в норме и патологии”.

На секционных заседаниях также рассматривались вопросы механизмов коммуникации с помощью ассистивных технологий, коморбидной патологии при речевых расстройствах, подходы при онлайн обучении, особенности речи при психопатологиях и при РАС, нарушения раннего речевого развития и развития дошкольников, вопросы психофизиологии мозговые основы вербального творчества. На заседании круглого стола обсуждались проблемы дифференциальной диагностики речевых нарушений у детей. С докладами и предложениями выступили д. пед. н. Ю.О. Филатова, д. пед. н. Л.В. Лопатина, д. пс. н. А.Н. Корнев, д. м. н. С.В. Гречаный.

По итогам дискуссий, прошедших во время работы Конференции, участники конференции предложили:

1. Провести следующую XI Всероссийскую (с международным участием) научно-практическую конференцию “Центральные механизмы речи”, посвященную проф. Н.Н. Трауготт, в 2024 г.
2. Оказывать содействие членам профессионального сообщества в организации совместных фундаментальных мультидисциплинарных исследований в области становления устной речи у детей, а также механизмов формирования навыков чтения и понимания текстов. Практическим результатом таких фундаментальных исследований должны стать разработки современных методик работы педагогов различных специальностей.
3. Разработать мероприятия по обмену опытом в области внедрения доказательных практик коррекционно-восстановительного обучения, поскольку такие практики являются необходимым условием развития системы реабилитации и абилитации лиц с речевыми нарушениями. Это необходимо как для формирования в России культуры

психодиагностики, так и для накопления новых данных о патогенезе расстройств речи, для создания масштабируемых коррекционных практик.

4. Регулярно проводить курсы повышения квалификации по актуальным вопросам речевой патологии у детей для неврологов и психологов педиатрической сети.

5. Следует констатировать разрыв между методологией обучения чтению и литературе в школах РФ и современными научными моделями понимания текста. Встает острая необходимость реформирования, а затем регулярной актуализации методологической основы образовательных программ по чтению, литературе, окружающему миру и иностранным языкам, основываясь на научно обоснованных психологических, психолингвистических и психофизиологических закономерностях развития детей и подростков. В связи с этим предлагается:

- в методологии обучения навыкам понимания текстов при чтении перенести акцент на формирование у детей оптимальных стратегий обработки текстов разной жанровой и типологической принадлежности (художественные, научные, описательные и повествовательные и т.п.);

- включить в образовательный стандарт формирование навыков работы не только с бумажными, но и с электронными текстами;

- разработать и ввести в оценку школьных образовательных программ РФ критерии читабельности текста, основанные на лингвистических параметрах; с этой целью необходимо создать и внедрить общедоступные инструменты рубрикации учебных и художественных текстов по степени их читабельности, с использованием существующих лингвистических индексов; в планировании образовательного процесса необходимо использовать ранжирование текстов с учетом возраста и достижений ребенка;

- внедрить текстологическую экспертизу учебников, как обязательную при грифования учебных пособий.

6. С учетом распространенности би- и мультилингвизма в РФ необходимо актуализировать

методические рекомендации и критерии оценки образовательных программ, а также системы оценивания усвоения образовательных программ детьми-билингвами. Ресурсом для объединения данных корпусов по разным языкам, на основе которых можно разрабатывать обучающие стратегии и методический материал для работы по развитию языка и речи у детей-билингвов, в том числе с ОВЗ, нарушениями зрения, слуха и др., можно рассматривать платформу ЛингвоДок.

7. Необходимо разработать стандартизированные методики для исследования речи у детей с РАС, а также рекомендации по проведению диагностических процедур детей, предназначенных для широкого круга специалистов.

8. Инициировать проекты комплексных междисциплинарных исследований основных клинических форм недоразвития речи у детей с участием неврологов, психиатров и клинических психологов под руководством ведущих научно-исследовательских учреждений РФ.

9. С целью оптимизации и унификации диагностического процесса целесообразно регулярно проводить диагностические семинары (региональные и всероссийские) на базе ведущих университетов и НИИ.

10. Предложить Минобрнауки учредить гранты для финансирования переводных изданий мировой профессиональной литературы (руководств, монографий) по актуальным вопросам речевой патологии и методов оказания помощи детям.

11. Обсудить ход реализации пунктов намеченной программы на Конференции 2024 г.

12. Поручить Оргкомитету Конференции направить в Министерство науки и высшего образования, Министерство Просвещения данную Резолюцию как отчет о работе научно-практической конференции и консолидированное мнение специалистов, специализирующихся в области речи психофизиологов, нейробиологов, нейролингвистов, педиатров, логопедов, нейропсихологов, социальных работников, неврологов, психиатров, педагогов, фониатров и др.