

## Динамика вызванных потенциалов в процессе становления грамотности

**Ребрейкина А.Б.**

*Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИНВД и НФ РАН),  
г. Москва, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5714-2040>, e-mail: [anna.rebreikina@gmail.com](mailto:anna.rebreikina@gmail.com)*

**Ларионова Е.В.**

*Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИНВД и НФ РАН),  
г. Москва, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3637-1343>, e-mail: [larionova.ekaterin@gmail.com](mailto:larionova.ekaterin@gmail.com)*

**Мартынова О.В.**

*Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИНВД и НФ РАН),  
г. Москва, Российская Федерация  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-2893>, e-mail: [omartynova@ihna.ru](mailto:omartynova@ihna.ru)*

Грамотность — сложное разноплановое явление, хорошо изученное в психологии и педагогике. Анализируя отдельные лингвистические процессы, нейрофизиологи пытаются понять механизмы овладения письмом и чтением. В настоящей работе мы рассматриваем данные, полученные с помощью метода вызванных потенциалов, в свете орфографических, лексических, семантических, синтаксических аспектов грамотности, а также изменения компонентов вызванных потенциалов у детей и взрослых в процессе освоения языка и при дислексии — наиболее изученном нарушении чтения. Метод вызванных потенциалов может помочь понять, как общие, универсальные нейрофизиологические основы развития грамотности, так и уникальные особенности разных языков.

**Ключевые слова:** развитие грамотности, чтение, опознание ошибок, дислексия, вызванные потенциалы, N170, N400, P600.

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 20-013-00514.

**Для цитаты:** Ребрейкина А.Б., Ларионова Е.В., Мартынова О.В. Динамика вызванных потенциалов в процессе становления грамотности [Электронный ресурс] // Современная зарубежная психология. 2020. Том 9. № 2. С. 21—33. DOI: <https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090202>

## Event-related potentials during literacy

**Anna B. Rebreikina**

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS,  
Moscow, Russia,*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5714-2040>, e-mail: [anna.rebreikina@gmail.com](mailto:anna.rebreikina@gmail.com)*

**Ekaterina V. Larionova**

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS,  
Moscow, Russia,*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3637-1343>, e-mail: [larionova.ekaterin@gmail.com](mailto:larionova.ekaterin@gmail.com)*

**Olga V. Martynova**

*Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS,  
Moscow, Russia,*

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-2893>, e-mail: [omartynova@ihna.ru](mailto:omartynova@ihna.ru)*

Literacy is a complex and multidimensional phenomenon that has been well studied in psychology and pedagogy. Neurophysiologists try to understand the mechanisms of writing and reading acquisition by analyzing different lin-

guistic processes. In this paper, we review the data that were revealed by using the event-related potentials (ERPs) method in the light of spelling, lexical, semantic and syntactic aspects of literacy, as well as changes in the components of ERPs in children and adults during language acquisition and in dyslexia, the most studied reading disorder. The ERPs method can help to understand both the general, universal neural underpinnings of literacy development and the unique features of different languages.

**Keywords:** literacy acquisition, reading, error recognition, dyslexia, event related potentials, N170, N400, P600.

**Funding:** The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research (RFBR), project number 20-013-00514.

**For citation:** Rebreikina A.B., Larionova E.V. Martynova O.V. Event-related potentials during literacy [Elektronnyi resurs]. *Sovremennaya zarubezhnaya psikhologiya* = *Journal of Modern Foreign Psychology*, 2020. Vol. 9, no. 2, pp. 21—33. DOI: <https://doi.org/10.17759/jmfp.2020090202> (In Russ.).

Исследование грамотности представляет особый интерес для психологии развития, потому что обучение чтению и письму тесно взаимосвязаны с навыком овладения языком, формирующимся по мере взросления. В литературе описаны факторы, играющие важную роль в становлении грамотности. Это, прежде всего, определенный уровень развития речевых функций, фонематического анализа и синтеза, а также неречевых психических функций — мышления, внимания, зрительной и слухоречевой памяти [2; 7]. Кроме того, овладение чтением и письмом, как психолингвистический и социально-ориентированный процесс, зависит от социальной среды, социально-экономического статуса, а также от структуры языка, которым овладевает учащийся [29]. В свою очередь, грамотность, т. е. полученные знания и компетентность в чтении и письме, улучшает память, зрительный поиск и пространственный анализ, восприятие и понимание речи [11; 24]. Таким образом, грамотность представляет собой сложный когнитивный домен, связанный с множеством функций, которые включают в себя умение декодировать звуки устной речи в письменные символы и, наоборот, письменные в речевые, с учетом присущих языку правил.

Процесс становления грамотности проходит путь от развернутой системы сознательных действий в начале обучения до автоматизированного способа выполнения более сложного действия. В нейролингвистических исследованиях широко используется метод вызванных потенциалов (ВП), который имеет хорошее временное разрешение и позволяет оценить разные этапы быстро протекающей мозговой активности, связанной с восприятием вербальной информации. Нейрофизиологические корреляты когнитивных процессов, лежащих в основе грамотного письма и чтения, можно оценить, манипулируя теми или иными параметрами стимулов. Так, сравнение слов и наборов символов, псевдослов (бессмысленных слов, составленных в соответствии с нормами языка) и «не слов» (буквенных сочетаний, не свойственных данному языку) помогает оценить низкоуровневые этапы обработки информации, определить компоненты вызванных потенциалов, чувствительные к орфографическим характеристикам, т. е. к зрительному знакомству с написанием букв и

слов, присущих языку. При сопоставлении восприятия слов и псевдослов можно выявить этапы обработки информации, чувствительные к лексическим и семантическим параметрам. Использование словосочетаний и простых предложений в качестве стимулов позволяет оценить семантические и синтаксические процессы, связанные с пониманием.

Однако, несмотря на значительное количество нейрофизиологических исследований, они, как правило, охватывают лишь отдельные аспекты проблемы. В настоящем обзоре мы объединили эти работы и рассмотрели их в контексте формирования орфографических, лексических, семантических и синтаксических уровней восприятия вербальной информации как компонентов грамотности в норме и при нарушениях овладения устной и письменной речью.

### Вызванные потенциалы: N170, N400 и поздний позитивный комплекс

В нейролингвистических исследованиях чаще всего упоминаются такие компоненты ВП мозга, как N170, N400 и поздний позитивный комплекс (LPC или P600).

Компонент N170 или N1 — негативное отклонение ВП, наблюдающееся в теменно-затылочных областях в интервале около 150—200 мс после зрительного предъявления стимулов. Этот компонент, прежде всего, связывают с орфографической обработкой, подразумевающей зрительный анализ слова, он зависит от опыта восприятия букв, буквосочетаний и слов [10; 52], т. е. может отражать изменения навыка чтения. Было показано, что компонент N170 чувствителен к смешанному регистру букв в слове, к длине и частоте встречаемости слов [10; 52]. Кроме того, этот компонент отражает и процессы лексической обработки: его амплитуда различается на слова, псевдослова и псевдогомофоны (слова с неправильным написанием, но звучащие как реальные слова) [10; 28; 44].

Компонент N400 — негативная волна ВП, наиболее выраженная в центрально-теменных областях во время обработки письменной и устной вербальной информации [27]. Первоначально компонент N400 был идентифицирован как ответ на семантически неправильные

окончания предложений (например: «Я беру кофе со сливками и собакой») [27]; но позже было показано, что он чувствителен к широкому спектру стимулов и их характеристик, включая согласованность предложений, повторение, семантическое праймирование, лексическую связанность, конкретность, абстрактность, частотность слов и многих других, при этом относительно не чувствителен к физическим изменениям слов без изменения их смысла, например, к изменениям шрифта или регистра [6]. N400 коррелирует с уровнем владения языком, что делает его хорошим инструментом для изучения владения вторым языком у взрослых [17; 18; 30].

N400 часто сопровождается более поздним положительным отклонением ВП с латентностью 500—900 мс, известным как поздний положительный комплекс или поздний положительный компонент (late positive component, LPC или P600). Этот компонент связывают с фонологической обработкой и фонологическими представлениями [54], а также с формированием и сохранением следов памяти для вербальных стимулов [41].

Далее эти компоненты ВП рассмотрены нами в контексте различных уровней восприятия вербальной информации.

### Начальный этап обработки вербальной информации

Развитие навыка чтения происходит постепенно: в начале обучения оно является побуквенным, последовательным, а к концу начальной школы (к возрасту 10 лет) обработка печатных слов автоматизируется [10].

Как в отечественной, так и в зарубежной педагогике и психологии в рамках фонетического подхода к обучению чтению на первоначальном этапе основное внимание уделяется процессам более низкого уровня, таким как запоминание названия буквы и развитие фонографических навыков, фонематическое осознание и развитие фонологических навыков, то есть умение выделять в слове отдельные фонемы. Все эти навыки необходимы для формирования устойчивых связей между фонемой и графемой. Постепенно происходит слияние букв в слог, а затем слияние слогов в слово, формируется углубленное понимание отношений между орфографией и фонологией [2].

Развитие зрительной обработки букв и слов находит отражение в изменениях компонента N170. У дошкольников, не знающих буквы, этот компонент имел схожую амплитуду на слова, псевдослова, «не слова», наборы символов и псевдошрифты (символы, похожие на реальные буквы). Различия компонента N170 на эти стимулы были выявлены только у хорошо владеющих буквами дошкольников и детей старше 6,5—7 лет [8; 9; 40; 52] и коррелировали со скоростью чтения и уровнем семантических знаний [36]. Следует отметить, что уже после нескольких часов тренировки нечитающих детей соотношению фонемы с графемой

амплитуда компонента N170 на слова становилась больше, чем на псевдошрифты [10]. Интересно, что у детей 9 и 11 лет, а также у взрослых, разница компонента N170 между словами и символами значима, но меньше, чем у детей 7—8 лет [8; 10]. Есть мнение, что на ранних стадиях развития навыка чтения формируются избыточные нейронные сети, что делает различия между словами и символами более сильными, но по мере повышения эффективности нейронных сетей и тонкой их настройки реакция на различия между стимулами становится менее выраженной [52].

В отличие от эффектов, связанных со зрительным анализом графем, эффекты лексического соответствия языку для компонента N170 отсутствуют у детей 7 лет и даже 9 лет, но появляются в более позднем возрасте [10; 36]. Различия компонента N170 между словами и «не словами», т. е. дифференциация уже не на уровне буквы и символа, а на уровне более крупных элементов слов (типичных и нетипичных для языка буквосочетаний, слогов), появляются к 9 годам [37]. Считается также, что компонент N170 у младших школьников отражает только прелексическую обработку, так как процесс чтения еще недостаточно автоматизирован [28].

Таким образом, после начала обучения чтению довольно быстро возникают изменения компонента ВП N170 при восприятии букв изучаемого языка, при этом развитие автоматизированной зрительной обработки слогов и целых слов продолжается до возраста 9—10 лет.

### Обработка лексических единиц

Для автоматизации чтения важно развитие специализированной переработки лексических единиц. Поведенческие исследования показали, что дети 7 лет уже реагируют быстрее и точнее на имеющие смысл (реальные) слова, чем на произносимые псевдослова, представляющие собой простые последовательности согласный-гласный-согласный. Однако только к 9—10 годам дети используют фонологические и орфографические паттерны для различения псевдослов и бессмысленных буквенных строк так же как взрослые. К этому возрасту также формируется автоматизм в лексической обработке [9].

В нейрофизиологических исследованиях было показано, что компонент ВП N400 связан с лексической обработкой. Так, по мнению некоторых авторов, амплитуда N400 отражает легкость или количество усилий, необходимых для интеграции орфографической, фонологической и семантической информации во время лексической обработки [27]. По мнению других авторов, амплитуда N400 отражает непосредственно лексическую обработку [54]. У детей в возрасте 7 лет амплитуда N400 была больше на «не слова», по сравнению со словами, но не псевдословами, в то время как у детей 11 лет, напротив, амплитуда была больше на

слова и псевдослова, что может говорить о более эффективной обработке словоподобных стимулов у последних (тратят меньше ресурсов на стимулы, не похожие на слова) и развитии автоматизации лексической обработки [9]. У детей 9 лет амплитуда компонента N400 отличалась на псевдослова по сравнению со словами [40]. Подобные лексические эффекты, влияющие на N400, обнаруживали и у взрослых при изучении нового языка: было показано, что уже после 14 часов обучения второму языку амплитуда N400 снижена при предъявлении слов по сравнению с псевдословами изучаемого языка [30].

Поздний положительный компонент ВП (LPC) связывают с формированием и сохранением следов памяти для вербальных стимулов, что важно для последующего распознавания слов во время лексической обработки [41]. У детей 8—9 лет LPC не отличался между словами и псевдогомофонами, которые имеют одинаковое фонологическое представление, но его амплитуда была значительно уменьшена для псевдослов, которые отсутствуют в фонологическом лексиконе [40; 54]. Аналогичные закономерности для P600 были получены и у подростков 12—14 лет [33]. Интересно, что повторное предъявление псевдослов у взрослых приводило к увеличению амплитуды LPC и коррелировало с увеличением скорости и точности чтения псевдослов, что авторы связывают с формированием и усилением следов памяти для псевдослов, облегчающих их обработку в процессе выполнения задания [41]. При изучении значений редких слов взрослыми были получены схожие для псевдослов результаты, при этом у более успешных испытуемых амплитуда LPC была больше по сравнению с испытуемыми, демонстрирующими менее успешные навыки; по мнению авторов, лучшие навыки демонстрировали испытуемые с более успешным формированием следов памяти для изучаемых слов [39]. При изучении второго языка псевдослова вызывали повышение амплитуды N400 на ранних стадиях обучения, а компонент P600 изменялся на более поздних этапах, что авторы интерпретируют как переход от лексической обработки вербальной информации к грамматической [18]. Полученные данные свидетельствуют о том, что, вероятно, LPC не связан непосредственно с лексической обработкой, а отражает повторный орфографический анализ и лексический доступ.

Существует предположение, что по мере развития навыка чтения на ранних этапах обработки слов начинает анализироваться и лексическая информация. Так, амплитуда компонента N170 у детей 9—10 лет была больше на «не слова», чем на слова и псевдослова, а у детей 11 лет — на псевдослова, чем на «не слова» и слова [12]. Эти данные были объяснены тем, что у детей 9—10 лет слова и псевдослова еще не дифференцируются на временном интервале около 200 мс, но их обработка происходит легче, чем «не слов», сильно отличающихся от языковых лексических норм. В более старшем возрасте «не слова» распознаются так же

легко и быстро, как слова, а псевдослова требуют больших усилий [12].

Необходимо отметить, что изменения чувствительности компонента N170 к словам и псевдословам может зависеть от типа задачи и инструкции [20].

Таким образом, лексическая обработка и у детей, и у взрослых происходит во временном интервале от 300 до 500 мс, что находит отражение в особенностях компонента N400. У взрослых эти процессы могут проходить на более ранних этапах, о чем свидетельствуют данные о N170, но вероятно, N170 отражает лексическую обработку в зависимости от условий задачи.

### Формирование орфографической грамотности

Изучение нейрофизиологических механизмов правописания на примере отслеживания ошибок в западноевропейской группе языков обычно проводят при помощи задач восприятия псевдогомофонов (ПГФ) по сравнению со словами и псевдословами. ПГФ — слова с неправильным написанием, но произносимые как существующие слова. Особенности различных компонентов ВП на эти стимулы у разных возрастных групп позволяют оценить пространственно-временную последовательность механизмов, обеспечивающих правописание.

У взрослых различия в ВП в ответ на слова и ПГФ наблюдались уже через 100 мс после предъявления стимулов: компонент P100 (позитивная волна, предшествующая N170) был выше на слова в правом полушарии, чем на ПГФ [28]. Компонент N170 был более выраженным в ответ на ПГФ, чем на слова и псевдослова, что авторы истолковали как отражение конфликта между фонологической и орфографической информацией [28]. В работе Саусенга [44] слова с измененной буквой, не нарушающей смысл слова, вызывали меньшую амплитуду компонента N160 (вероятно, аналогичного N170), чем обычные слова. Эти различия вызванных потенциалов между стандартными и нарушенными зрительными формами слов свидетельствуют о раннем взаимодействии между воспринимаемой буквенной информацией и хранящимися зрительно-орфографическими репрезентациями слов [44]. Кроме того, при обнаружении слов с ошибками взрослые с высокими навыками правописания показывают билатеральный эффект повышения амплитуды N170, во время как для взрослых с низкими навыками правописания этот эффект ограничивался левым полушарием [16]. По мнению авторов, это двустороннее топографическое распределение может отражать межполушарную кооперацию во время обработки текстов, особенно в таких сложных условиях, как при обнаружении ошибок.

У детей выявление орфографических несоответствий происходит на более поздних этапах обработки информации по сравнению со взрослыми. У детей 9—10 лет LPC выше на правильные слова, чем на ПГФ [37].

Схожие данные получены в другой работе: у детей 9 лет реакции ВП на орфографические нарушения обнаруживались в позднем временном интервале 700—900 мс [40].

Дети 9—10 лет демонстрировали большую лобно-центральную негативность между 200 и 500 мс (вероятно, аналогичную N400) при восприятии слов с ошибками, по сравнению с детьми 7—8 лет, однако различия между правильными словами и словами с ошибками наблюдались после 600 мс (аналогично P600) и только у старшей группы детей: правильные слова вызывали менее позитивный потенциал, чем слова с ошибкой [13]. При исследовании детей 8 лет, но разделенных на две группы на основании качества выполнения теста быстрого наименования (rapid-naming test), в котором необходимо было называть буквы, числа, изображения предметов и цвета, успешно справляющиеся с этим заданием демонстрировали более выраженные различия компонента N380 (аналогичного N400) и последующего положительного компонента (аналогичного LPC) при определении орфографических несоответствий по сравнению с детьми, медленно выполняющими тест наименования. По мнению авторов, эти наблюдения отражают трудности формирования связей между фонологическими и орфографическими характеристиками слов у последних [22].

Таким образом, в зарубежных исследованиях показано, что в процессе формирования орфографической грамотности чувствительность к неправильно написанным словам проявляют поздние компоненты ВП — N400 и следующий за ним LPC. По мере автоматизации навыка чтения появляются более ранние реакции в ВП на орфографические нарушения.

### Семантический анализ и понимание синтаксических структур

Первые проявления семантических и синтаксических процессов обнаруживаются еще в младенческом возрасте, задолго до освоения ребенком письма и чтения [21], а по мере совершенствования владения языком слова включаются в более сложные системные отношения.

Семантическую обработку связывают с компонентом N400 [27]. Эффект N400 обнаруживается в различных модальностях и заключается в том, что семантически не подходящие к контексту стимулы вызывают большие отрицательные ответы N400 по сравнению с семантически подходящими; такой контекст может быть задан картинкой, словом, предложением или дискурсом. Эффект N400 не зависит от языка и наблюдается даже в языке жестов [27]. N400 отражает, по меньшей мере, два аспекта: семантическую интеграцию в контекст и доступ к информации в долговременной памяти [32].

Уже в возрасте одного года дети с высоким уровнем словарного запаса демонстрировали эффекты повышения амплитуды N400 при прослушивании знакомых

и незнакомых (бессмысленных для ребенка) слов. Дети в возрасте 2 лет демонстрировали этот эффект на уровне простых предложений с существительными, подходящими и не подходящими по смыслу (например, «кот пьет мяч»), что указывает на то, что уже в младенческом возрасте дети могут семантически интегрировать слова в контекст предложения [21]. Дети в возрасте 5—7 лет демонстрировали эффекты N400 (350—500 мс) для семантически связанных категорий (например, «волк» и «медведь») по сравнению с семантически несвязанными (например, «волк» и «автомобиль») [47]. Схожие данные были получены у дошкольников при предъявлении семантически конгруэнтных и неконгруэнтных (например, «мой отец ест одеяло с яблоком») разговорных предложений [48].

При исследовании испытуемых в возрасте от 7 до 20 лет было показано, что эффекты обнаружения семантического несоответствия N400 более выражены в слуховой модальности по сравнению со зрительной, кроме того, они были больше у детей младшего возраста по сравнению с более старшими подростками [23]. По мнению авторов, это связано с тем, что с возрастом и опытом аномальные окончания предложений более ожидаемы и отражают меньшую зависимость от контекста, это требует меньшей интеграции и приводит к менее выраженным ответам [23]. Полученные результаты согласуются с данными, собранными при изучении овладения вторым языком у взрослых: более опытные и лучше владеющие вторым языком демонстрировали снижение амплитуды N400 по сравнению с менее опытными при предъявлении предложений, связанных по смыслу [17].

LPC также связывают с обнаружением ошибочных семантических структур. Семантические ожидания, основанные на контексте, могут облегчить обработку текста: в естественной (обычной) ситуации чтения дети 11 лет показывали различия LPC на конгруэнтные («небо синее») и неконгруэнтные («небо толстое») утверждения [26]. Схожие данные получены при восприятии детьми осмысленных и бессмысленных фраз: большие значения амплитуды позднего позитивного компонента в лобных областях коры наблюдались при обработке осмысленной фразы [53]. Эффект повышения амплитуды P600 (LPC) у детей 12—13 лет обнаруживался позже при сравнении семантически правильных и похожих на них семантически ошибочных слов, чем при сравнении семантически правильных и не похожих ошибочных слов, что отражает задержку семантической обработки для похожих слов [45]. Вероятно, этот компонент отвечает за нейронные процессы, связанные с извлечением следов памяти и оценкой соответствия. По мнению некоторых авторов, компонент P600 может быть маркером конкуренции между двумя значениями слов и трудности понимания смысла слов [57].

Кроме того, LPC отражает процессы, связанные с обнаружением морфосинтаксических аномалий, менее изученных по сравнению с семантическими. Нейрофизиологические исследования показывают, что

синтаксические знания появляются в возрасте от 2 до 3 лет: ранняя левая передняя негативность (early left anterior negativity, ELAN) и LPC демонстрировали чувствительность к синтаксическим нарушениям [56]. Синтаксические процессы у детей характеризуются индивидуальной изменчивостью, которая связана с развитием когнитивных способностей: например, более раннее начало и более широкое распределение компонента P600 при прослушивании фраз с нарушениями структуры демонстрируют дети 7—9 лет, лучше знающие грамматику, по сравнению со своими менее образованными сверстниками [55]. Эффекты P600 обнаруживаются и у взрослых при предъявлении предложений с нарушениями согласования между существительным и глаголом, однако при увеличении скорости предъявления эти эффекты уменьшались [51].

Таким образом, обнаружение семантических ошибок может проявляться у детей достаточно рано, но зависит от сложности и модальности языковых структур. Процессы, связанные с пониманием синтаксических конструкций, формируются позже, чем семантические.

#### **Общие закономерности изменений компонентов ВП в процессе автоматизации чтения: амплитуда, топография, латентность**

По мере развития навыков кодирования и интеграции орфографии и фонологии, чтение требует все меньше усилий, распознавание слов становится все более быстрым и автономным, осуществляется с меньшими затратами когнитивных ресурсов. К среднему школьному возрасту у детей наблюдаются качественные изменения произвольного внимания, осознанного запоминания, овладения аналитической стратегией мышления, что способствует развитию орфографических навыков [1].

Окумура с коллегами выявили, что улучшение навыка чтения в результате краткосрочной фонологической тренировки связано с увеличением амплитуды компонента N170 у подростков 13 лет [38]. У взрослых, по сравнению со старшеклассниками-подростками 15—17 лет, уменьшались амплитуда и латентность компонента N170 [19]. Латентность компонента N170 у детей 8 лет — около 210 мс, но с развитием навыков чтения она уменьшается до 170 мс [52]. Амплитуда компонента N400 также изменяется по мере развития навыка чтения. Так, у первоклассников (возраст около 7 лет), читающих на уровне четвероклассников (возраст около 10 лет), компонент N400 был хорошо выражен на разные словесные и буквенные стимулы, тогда как у плохо читающих первоклассников этот компонент был снижен [9]. У подростков латентность и амплитуда N400 при выполнении сложной семантической задачи практически не отличались от взрослых, но были меньше по сравнению с детьми 7—9 лет [3]. Латентность N400 была меньше у детей 8—10 лет по сравнению с детьми 6—7 лет [34]. В лонгитюдном

исследовании детей дошкольного и младшего школьного возраста было показано, что при овладении навыком чтения, т. е. по мере автоматизации этого процесса, происходит увеличение амплитуды LPC [14]. Латентность LPC также уменьшается с возрастом [53]. Сдвиг латентности компонентов ВП с течением времени отражает все более быструю обработку информации, поскольку нейронные сети, связанные с чтением, постепенно консолидируются посредством процессов развития синаптической эффективности и настройки.

С улучшением качества чтения изменяется и топография различных компонентов ВП. Так, компонент N170 регистрируется при восприятии самых разных зрительных стимулов, однако на напечатанные слова у опытных читателей он больше в левом полушарии, чем в правом [10; 52]. Было выявлено, что его левосторонняя латерализация формируется по мере увеличения стажа чтения: у детей 7 лет компонент N170 двусторонний, а у детей 9 лет имеет левополушарную асимметрию [8]. У дошкольников, хорошо знающих буквы, различия компонента N170 между словами и наборами символов были выявлены только в правом полушарии, что может указывать на начальную специализацию к словам, но, скорее всего, она связана с эффектами визуального знакомства [10; 52]. У детей 8 лет такие различия наблюдались билатерально [52], что предполагает задействование более обширных областей мозга, включая языковые области, но не ограничиваясь ими; такие множественные активации, включая двусторонние затылочно-височные области, могут указывать на отсутствие тонко настроенных процессов распознавания. А у детей 11—12 лет, как и у взрослых, только левое полушарие показало дифференциальные реакции компонента N170 на слова и символы, что связывают с автоматизацией связей между буквами и звуками [52]. В исследовании Саччи было показано, что левосторонняя асимметрия компонента N170 при развитии навыка чтения связана с усилением фонологических способностей [42]. Левосторонняя латерализация N170 развивается у взрослых в процессе изучения нового языка [43]. Эти данные подтверждают гипотезу фонологического картирования, согласно которой левополушарная латерализация для напечатанных слов отражает автоматические связи между левосторонними областями, отвечающими за фонологическую обработку, и затылочно-височными областями, отвечающими за зрительное распознавание [52].

С развитием автоматизации обработки языковой информации связывают смену топографии N400 в школьном возрасте: если у детей 5—6 лет наблюдалось широкое распространение N400 во фронтальных, центрально-теменных и височных областях, то с возрастом топография N400 локализовалась в центрально-теменных областях, что может быть также связано с увеличением по мере взросления словарного запаса [5]. Похожие закономерности в топографии отмечают и для LPC у 12—13-летних детей: этот компонент был более четко

локализован по сравнению с детьми 9 лет [53]. Вместе эти данные показывают, что в более молодом возрасте семантическая обработка относительно медленная и имеет широкое топографическое распределение.

Таким образом, основные общие нейрофизиологические закономерности заключаются в уменьшении латентности и увеличении степени локализации компонентов ВП по мере автоматизации навыка чтения к среднему школьному возрасту.

### Нарушения овладения устной и письменной речью

Дислексия характеризуется трудностями формирования навыка чтения и нередко сопровождается проблемами в правописании. Многочисленные нейрофизиологические исследования дислексии показали изменения на самых различных уровнях обработки вербальной информации, а также продемонстрировали возможные механизмы компенсации этих нарушений.

Так, в работах со слуховыми ВП при прослушивании речевых стимулов было показано увеличение латентности ранних компонентов, что, по мнению авторов, говорит о нарушениях фонологической обработки [25]. Ранние компоненты зрительных ВП, отражающие прелексическую орфографическую обработку, также изменены при дислексии. Компоненты P1 (P100) и N1 (или N170) не были чувствительны к контрасту словоподобных стимулов (слова, псевдослова) с «не словами» и символами [15]. У взрослых с дислексией не было эффекта слова—псевдослова в отличие от здоровых взрослых для компонентов P1 и N1 [28].

Исследования более поздних компонентов ВП при дислексии свидетельствуют о недостаточной интеграции орфографической и фонологической информации у этой группы. Было выявлено снижение левосторонней топографии различий компонента N300 (более ранняя негативная волна, чем N400, но также связанная с фонологическим кодированием и интеграцией) между псевдословами и «не словами» [15].

В другой работе при зрительном предъявлении слов после их устного произношения у детей с дислексией наблюдалось снижение, по сравнению с нормой, амплитуды N300 в левом полушарии и ее увеличение в правом [31]. Некоторые авторы сообщают о сохранности компонента N400 и эффекта снижения его амплитуды при повторном предъявлении слов и псевдослов у взрослых с дислексией [35]. Другими авторами было показано увеличение латентности компонента N400 на семантически связанные слова, что говорит о том, что семантическая интеграция требует больше усилий для читателей с дислексией [49]. Некоторые исследователи полагают, что взрослые с дислексией, практически скомпенсировавшие проблемы с чтением, могут опираться не на семантику как таковую, а на морфемы, которые являются наименьшими единицами значения и обеспечивают прямую связь между формой и смыслом: морфологические эффекты прайминга у них

наблюдались около 200 мс, в то время как у контроля — около 400 мс [50].

Иной механизм компенсации нарушения за счет использования семантических характеристик был предложен к обсуждению на основании того, что у студентов с дислексией при восприятии слов с семантически связанной или несвязанной картинкой наблюдался больший компонент N400 и сниженный LPC по сравнению с контролем [46]. У детей с дислексией в подобном задании также наблюдалось снижение амплитуды LPC [14]. Кроме того, у детей с дислексией амплитуда LPC не отличалась для слов, псевдослов и псевдогомофонов, что может указывать на нарушение доступа к фонологическим представлениям [54].

Таким образом, исследования с использованием ВП показывают, что при дислексии нарушаются как ранние этапы, связанные с перцептивным кодированием, так и более поздние, связанные с интеграцией орфографической и фонологической информации.

Необходимо отметить, что по сравнению с дислексией другие нарушения овладения устной и письменной речью, такие как дисграфия, специфическое расстройство речи (specific language impairment, SLI/oral and written language learning disability, OWL LD) остаются практически неизученными. Вместе с тем, с помощью фМРТ показано, что функциональная связность во время выполнения одной и той же орфографической задачи этих диагностических групп и пациентов с дислексией отличается, как и общее количество функциональных связей, что дает основание считать их уникальными диагностическими группами [4]. Вероятно, применение метода ВП при сравнительном изучении этих нарушений пролило бы свет на различия нейрофизиологических механизмов обработки вербальной информации. Такие работы только начинают появляться [37; 40], однако полноценного сравнительного нейрофизиологического исследования этих групп до настоящего времени не проводилось.

### Заключение

Осваивая язык, дети и взрослые проходят длинный путь от восприятия вербальной информации, понимания семантических и синтаксических структур к грамотному письму и чтению. Метод вызванных потенциалов предоставляет возможность для изучения механизмов разноуровневых лингвистических процессов. Наиболее изученные компоненты ВП — N170, N400, LPC, отражая различные этапы переработки информации, демонстрируют схожие закономерности в процессе становления грамотности, как у детей, овладевающих родным языком, так и у взрослых при изучении второго языка.

Компонент N170 на начальных этапах изучения языка связан в основном с анализом слова как изображения, отражает орфографическое знакомство с

отдельными буквами и свойственными языку буквосочетаниями. У детей и начинающих осваивать второй язык взрослых обработку лексических единиц отражает более поздний компонент N400, но по мере становления грамотности, на лексические характеристики реагирует и компонент N170 — формируется его левосторонняя асимметрия и уменьшается латентность. Компоненты N400 и LPC детектируют семантические и синтаксические аномалии еще до начала освоения письма и чтения, но отражают эти же процессы и во взрослом возрасте, становясь более локализованными и коротколатентными по мере становления грамотного письма и чтения.

Следует отметить, что метод ВП накладывает некоторые ограничения на используемые парадигмы и затрудняет изучение процесса естественного чтения. Вероятно, поэтому работ, посвященных синтаксическим процессам, с использованием этого метода не так

много. Грамотное письмо и связанные с ним нарушения практически не освещены в нейролингвистических исследованиях, хотя их изучение является перспективным направлением для понимания механизмов овладения письменной речью. Также надо отметить, что совокупность имеющихся данных о связях компонентов ВП с теми или иными процессами обработки вербальной информации создает возможность использования их для разработки диагностических инструментов оценки вероятных причин нарушений развития письма и чтения.

Кроме того, принципы письма и чтения в различных языковых группах отличаются, поэтому специфические особенности конкретного языка могут оставаться нераскрытыми. Метод вызванных потенциалов может помочь понять, как общие, универсальные нейрофизиологические основы развития грамотности, так и уникальные особенности разных языков.

### Литература

1. Елецкая О.В. Особенности лексического запаса и лексических операций у школьников с дизорфографией [Электронный ресурс] // Вестник Пермского государственного гуманитарно-педагогического университета. Серия № 1. Психологические и педагогические науки. 2014. № 2—1. С. 154—159. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-leksicheskogo-zapasa-i-leksicheskikh-operatsiy-u-shkolnikov-s-dizorfofografiy/viewer> (дата обращения: 15.06.2020).
2. 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 / Под ред. О.А. Величенковой 2019. С. 6—23.
3. A developmental ERP study of verbal and non-verbal semantic processing / A. Cummings [et al.] // Brain Research. 2008. Vol. 1208. P. 137—149. DOI:10.1016/j.brainres.2008.02.015
4. Berninger V.W., Richards T.L., Abbott R.D. Differential diagnosis of dysgraphia, dyslexia, and OWL LD: Behavioral and neuroimaging evidence // Reading and Writing. 2015. Vol. 28. № 8. P. 1119—1153. DOI:10.1007/s11145-015-9565-0
5. Brain activity and language assessment using event-related potentials: Development of a clinical protocol / J.M. Byrne [et al.] // Developmental Medicine and Child Neurology. 1999. Vol. 41. № 11. P. 740—747. DOI:10.1017/S0012162299001504
6. Cheyette S.J., Plaut D.C. Modeling the N400 ERP component as transient semantic over-activation within a neural network model of word comprehension // Cognition. 2017. Vol. 162. P. 153—166. DOI:10.1016/j.cognition.2016.10.016
7. Children learn to read: how visual analysis and mental imagery contribute to the reading performances at different stages of reading acquisition / E. Commodari [et al.] // Journal of Psycholinguistic Research. 2020. Vol. 49. № 1. P. 59—72. DOI:10.1007/s10936-019-09671-w
8. Coarse and fine N1 tuning for print in younger and older Chinese children: Orthography, phonology, or semantics driven? / X. Tong [et al.] // Neuropsychologia. 2016. Vol. 91. P. 109—119. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2016.08.006
9. Coch D. The N400 and the fourth grade shift // Developmental Science. 2015. Vol. 18. № 2. P. 254—269. DOI:10.1111/desc.12212
10. Coch D., Meade G. N1 and P2 to words and wordlike stimuli in late elementary school children and adults // Psychophysiology. 2016. Vol. 53. № 2. P. 115—128. DOI:10.1111/psyp.12567
11. Demoulin C., Kolinsky R. Does learning to read shape verbal working memory? // Psychonomic Bulletin & Review. 2016. Vol. 23. № 3. P. 703—722. DOI:10.3758/s13423-015-0956-7
12. Development of neural specialization for print: Evidence for predictive coding in visual word recognition / J. Zhao [et al.] // PLoS Biology. 2019. Vol. 17. № 10. 17 p. DOI:10.1371/journal.pbio.3000474
13. Development of sensitivity to orthographic errors in children: An event-related potential study / M. Heldmann [et al.] // Neuroscience. 2017. Vol. 358. P. 349—360. DOI:10.1016/j.neuroscience.2017.07.002
14. Does the late positive component reflect successful reading acquisition? A longitudinal ERP study / C. Wachinger [et al.] // NeuroImage: Clinical. 2018. Vol. 17. P. 232—240. DOI:10.1016/j.nicl.2017.10.014
15. Electrophysiological correlates of impaired reading in dyslexic pre-adolescent children / S. Araújo [et al.] // Brain and Cognition. 2012. Vol. 79. № 2. P. 79—88. DOI:10.1016/j.bandc.2012.02.010
16. ERP Effects of Word Exposure and Orthographic Knowledge on Lexical Decisions in Spanish / A.A. González-Garrido [et al.] // Journal of Behavioral and Brain Science. 2015. Vol. 5. № 6. P. 185—193. DOI:10.4236/jbbs.2015.56019



17. ERP indicators of L2 proficiency in word-to-text integration processes / C.L. Yang [et al.] // *Neuropsychologia*. 2018. Vol. 117. P. 287—301. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2018.06.001
18. Event-related Potentials as Metrics of Foreign Language Learning and Loss / L. Osterhout [et al.] // *The Oxford handbook of language attrition* / Eds. M.S. Schmid, B. Köpke. Oxford: Oxford University Press, 2019. P. 403—416.
19. Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence / S. Brem [et al.] // *Neuroimage*. 2006. Vol. 29. № 3. P. 822—837. DOI:10.1016/j.neuroimage.2005.09.023
20. *Faisca L., Reis A.I.D., Araújo S.* Early brain sensitivity to word frequency and lexicality during reading aloud and implicit reading // *Frontiers in Psychology*. 2019. Vol. 10. Article ID 830. 13 p. DOI:10.3389/fpsyg.2019.00830
21. *Friedrich M., Friederici A.D.* Maturing brain mechanisms and developing behavioral language skills // *Brain and Language*. 2010. Vol. 114. № 2. P. 66—71. DOI:10.1016/j.bandl.2009.07.004
22. *Gómez-Velázquez F.R., González-Garrido A.A., Vega-Gutiérrez O.L.* Naming abilities and orthographic recognition during childhood an event-related brain potentials study // *International Journal of Psychological Studies*. 2013. Vol. 5. № 1. P. 55—68. DOI:10.5539/ijps.v5n1p55
23. *Holcomb P.J., Coffey S.A., Neville H.J.* Visual and auditory sentence processing: A developmental analysis using event-related brain potentials // *Developmental Neuropsychology*. 1992. Vol. 8. № 2—3. P. 203—241. DOI:10.1080/87565649209540525
24. *Huettig F., Pickering M.J.* Literacy advantages beyond reading: Prediction of spoken language // *Trends in Cognitive Sciences*. 2019. Vol. 23. № 6. P. 464—475. DOI:10.1016/j.tics.2019.03.008
25. Impaired neural mechanism for online novel word acquisition in dyslexic children / L. Kimppa [et al.] // *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. № 1. P. 1—12. DOI:10.1038/s41598-018-31211-0
26. Impaired semantic processing during sentence reading in children with dyslexia: combined fMRI and ERP evidence / E. Schulz [et al.] // *Neuroimage*. 2008. Vol. 41. № 1. P. 153—168. DOI:10.1016/j.neuroimage.2008.02.012
27. *Kutas M., Federmeier K.D.* Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP) // *Annual Review of Psychology*. 2011. Vol. 62. P. 621—647. DOI:10.1146/annurev.psych.093008.131123
28. Lexical and sublexical orthographic processing: An ERP study with skilled and dyslexic adult readers / S. Araújo [et al.] // *Brain and Language*. 2015. Vol. 141. P. 16—27. DOI:10.1016/j.bandl.2014.11.007
29. Lifewide learning for early reading development / A.J. Dowd [et al.] // *New Directions for Child and Adolescent Development*. 2017. Vol. 2017. № 155. P. 31—49. DOI:10.1002/cad.20193
30. *McLaughlin J., Osterhout L., Kim A.* Neural correlates of second-language word learning: Minimal instruction produces rapid change // *Nature Neuroscience*. 2004. Vol. 7. № 7. P. 703—704. DOI:10.1038/nrn1264
31. N300 indexes deficient integration of orthographic and phonological representations in children with dyslexia / S. Hasko [et al.] // *Neuropsychologia*. 2012. Vol. 50. № 5. P. 640—654. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2012.01.001
32. N400 analysis of semantic processing in children aged zero to six years: a literature review / T.A. Lindau [et al.] // *Revista CEFAC: Atualizacao Cientifica em Fonoaudiologia e Educacao*. 2017. Vol. 19. № 5. P. 690—702. DOI:10.1590/1982-0216201719513517
33. N400 and P600 effect of chinese words recognition / E. Wang [et al.] // *NeuroQuantology*. 2017. Vol. 15. № 4. P. 76—83. DOI:10.14704/nq.2017.15.4.1172
34. Neural processes associated with vocabulary and vowel-length differences in a dialect: An ERP study in pre-literate children / J.C. Bühler [et al.] // *Brain Topography*. 2017. Vol. 30. № 5. P. 610—628. DOI:10.1007/s10548-017-0562-2
35. Neural processing of spoken words in specific language impairment and dyslexia / P. Helenius [et al.] // *Brain*. 2009. Vol. 132. № 7. P. 1918—1927. DOI:10.1093/brain/awp134
36. Neurocognitive mechanisms of learning to read: print tuning in beginning readers related to word-reading fluency and semantics but not phonology / A.K. Eberhard-Moscicka [et al.] // *Developmental Science*. 2015. Vol. 18. № 1. P. 106—118. DOI:10.1111/desc.12189
37. Neurophysiological correlates of word processing deficits in isolated reading and isolated spelling disorders / S. Bakos [et al.] // *Clinical Neurophysiology*. 2018. Vol. 129. № 3. P. 526—540. DOI:10.1016/j.clinph.2017.12.010
38. *Okumura Y., Kita Y., Inagaki M.* Pure and short-term phonics-training improves reading and print-specific ERP in English: A case study of a Japanese middle school girl // *Developmental Neuropsychology*. 2017. Vol. 42. № 4. P. 265—275. DOI:10.1080/87565641.2017.1334784
39. *Perfetti C.A., Wlotko E.W., Hart L.A.* Word learning and individual differences in word learning reflected in event-related potentials // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2005. Vol. 31. № 6. P. 1281—1292. DOI:10.1037/0278-7393.31.6.1281
40. Print-, sublexical and lexical processing in children with reading and/or spelling deficits: an ERP study / F. Kemény [et al.] // *International Journal of Psychophysiology*. 2018. Vol. 130. P. 53—62. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2018.05.009
41. Repeated exposure to “meaningless” pseudowords modulates LPC, but not N (FN) 400 / B. Bermúdez-Margaretto [et al.] // *Brain Topography*. 2015. Vol. 28. № 6. P. 838—851. DOI:10.1007/s10548-014-0403-5
42. *Sacchi E., Laszlo S.* An event-related potential study of the relationship between N170 lateralization and phonological awareness in developing readers // *Neuropsychologia*. 2016. Vol. 91. P. 415—425. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2016.09.001

43. *Sánchez-Vincitore L.V., Avery T., Froud K.* Word-related N170 responses to implicit and explicit reading tasks in neoliterate adults // *International Journal of Behavioral Development*. 2018. Vol. 42. № 3. P. 321—332. DOI:10.1177/0165025417714063
44. *Sauseng P., Bergmann J., Wimmer H.* When does the brain register deviances from standard word spellings? — An ERP study // *Cognitive Brain Research*. 2004. Vol. 20. № 3. P. 529—532. DOI:10.1016/j.cogbrainres.2004.04.008
45. Semantic anomaly detection in school-aged children during natural sentence reading — A study of fixation-related brain potentials / O. Loberg [et al.] // *PloS One*. 2018. Vol. 13. № 12. 27 p. DOI:10.1371/journal.pone.0209741
46. Semantic compensation and novel word learning in university students with dyslexia / M. Rasamimanana [et al.] // *Neuropsychologia*. 2020. Vol. 139. 13 p. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2020.107358
47. Semantic processing in deaf and hard-of-hearing children: Large N400 mismatch effects in brain responses, despite poor semantic ability / P. Kallioinen [et al.] // *Frontiers in Psychology*. 2016. Vol. 7. Article ID 1146. 10 p. DOI:10.3389/fpsyg.2016.01146
48. Semantic processing of sentences in preschoolers with specific language impairment: Evidence from the N400 effect / J. Pijnacker [et al.] // *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2017. Vol. 60. № 3. P. 627—639. DOI:10.1044/2016\_JSLHR-L-15-0299
49. Semantic, syntactic, and phonological processing of written words in adult developmental dyslexic readers: an event-related brain potential study / J. Rüsseler [et al.] // *BMC Neuroscience*. 2007. Vol. 8. № 52. 10 p. DOI:10.1186/1471-2202-8-52
50. Spatiotemporal reorganization of the reading network in adult dyslexia / E. Cavalli [et al.] // *Cortex*. 2017. Vol. 92. P. 204—221. DOI:10.1016/j.cortex.2017.04.012
51. *Tanner D., Grey S., van Hell J.G.* Dissociating retrieval interference and reanalysis in the P600 during sentence comprehension // *Psychophysiology*. 2017. Vol. 54. № 2. P. 248—259. DOI:10.1111/psyp.12788
52. The development of print tuning in children with dyslexia: Evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI / U. Maurer [et al.] // *Neuroimage*. 2011. Vol. 57. № 3. P. 714—722. DOI:10.1016/j.neuroimage.2010.10.055
53. The Development of Words and Sentences Processing: ERP Study in 9-13 Years Old Children [Электронный ресурс] / E.I. Galperina [et al.] // *Neurobiology of Speech and Language. Proceedings of the 2nd International Workshop «Neurobiology of Speech and Language»*. The Laboratory of Behavioural Neurodynamics, Saint Petersburg State University / Eds. O. Shcherbakova, Y. Shtyrov. St. Petersburg: Scythia-print, 2018. 64 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36656783&> (дата обращения: 15.06.2020).
54. The time course of reading processes in children with and without dyslexia: an ERP study / S. Hasko [et al.] // *Frontiers in Human Neuroscience*. 2013. Vol. 7. Article ID 570. 19 p. DOI:10.3389/fnhum.2013.00570
55. *Wray A.H., Weber-Fox C.* Specific aspects of cognitive and language proficiency account for variability in neural indices of semantic and syntactic processing in children // *Developmental Cognitive Neuroscience*. 2013. Vol. 5. P. 149—171. DOI:10.1016/j.dcn.2013.03.002
56. Young children's sentence comprehension: Neural correlates of syntax-semantic competition / A. Strotseva-Feinschmidt [et al.] // *Brain and cognition*. 2019. Vol. 134. P. 110—121. DOI:10.1016/j.bandc.2018.09.003
57. *Yurchenko A., Lopukhina A., Dragoy O.* Meaning relatedness in polysemous and homonymous words: an ERP study in Russian: basic research program working papers. Higher School of Economics Research Paper No. WP BRP. Moscow: National Research University Higher School of Economics, 2018. Vol. 67. 15 p. DOI:10.2139/ssrn.3291173

## References

1. Eletskaia O.V. Osobennosti leksicheskogo zapasa i leksicheskikh operatsii u shkol'nikov s dizorfografiey = [Peculiarities of the lexical stock and lexical operations in schoolchildren with dysorphography] [Elektronnyi resurs]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo gumanitarno-pedagogicheskogo universiteta. Seriya № 1. Psikhologicheskie i pedagogicheskie nauki = [Bulletin of the Perm State Humanitarian and Pedagogical University. Series No. 1. Psychological and pedagogical sciences]*, 2014, no. 2—1, pp. 154—159. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-leksicheskogo-zapasa-i-leksicheskikh-operatsiy-u-shkolnikov-s-dizorfografiey/viewer> (Accessed 15.06.2020). (In Russ.).
2. Kornev A.N. Poetapnoe formirovanie operativnykh edinit pis'ma i chteniya kak bazovyi algoritm usvoeniya etikh navykov = [The phased formation of operational units of writing and reading as a basic algorithm for mastering these skills]. In Velichenkovi O.A. (eds.), *Narusheniya pis'ma i chteniya u detei: izuchenie i korrektsiya = [Disorders of writing and reading in children: study and correction]*, 2019, pp. 6—23. (In Russ.).
3. Cummings A. et al. A developmental ERP study of verbal and non-verbal semantic processing. *Brain Research*, 2008. Vol. 1208, pp. 137—149. DOI:10.1016/j.brainres.2008.02.015
4. Berninger V.W., Richards T.L., Abbott R.D. Differential diagnosis of dysgraphia, dyslexia, and OWL LD: Behavioral and neuroimaging evidence. *Reading and Writing*, 2015. Vol. 28, no. 8, pp. 1119—1153. DOI:10.1007/s11145-015-9565-0
5. Byrne J.M. et al. Brain activity and language assessment using event-related potentials: Development of a clinical protocol. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 1999. Vol. 41, no. 11, pp. 740—747. DOI:10.1017/S0012162299001504
6. Cheyette S.J., Plaut D.C. Modeling the N400 ERP component as transient semantic over-activation within a neural network model of word comprehension. *Cognition*, 2017. Vol. 162, pp. 153—166. DOI:10.1016/j.cognition.2016.10.016

7. Commodari E. et al. Children learn to read: how visual analysis and mental imagery contribute to the reading performances at different stages of reading acquisition. *Journal of Psycholinguistic Research*, 2020. Vol. 49, no. 1, pp. 59—72. DOI:10.1007/s10936-019-09671-w
8. Tong X. et al. Coarse and fine N1 tuning for print in younger and older Chinese children: Orthography, phonology, or semantics driven? *Neuropsychologia*, 2016. Vol. 91, pp. 109—119. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2016.08.006
9. Coch D. The N400 and the fourth grade shift. *Developmental science*, 2015. Vol. 18, no. 2, pp. 254—269. DOI:10.1111/desc.12212
10. Coch D., Meade G. N1 and P2 to words and wordlike stimuli in late elementary school children and adults. *Psychophysiology*, 2016. Vol. 53, no. 2, pp. 115—128. DOI:10.1111/psyp.12567
11. Demoulin C., Kolinsky R. Does learning to read shape verbal working memory? *Psychonomic bulletin & review*, 2016. Vol. 23, no. 3, pp. 703—722. DOI:10.3758/s13423-015-0956-7
12. Zhao J. et al. Development of neural specialization for print: Evidence for predictive coding in visual word recognition. *PLoS biology*, 2019. Vol. 17, no. 10, 17 p. DOI:10.1371/journal.pbio.3000474
13. Heldmann M. et al. Development of sensitivity to orthographic errors in children: An event-related potential study. *Neuroscience*, 2017. Vol. 358, pp. 349—360. DOI:10.1016/j.neuroscience.2017.07.002
14. Wachinger C. et al. Does the late positive component reflect successful reading acquisition? A longitudinal ERP study. *NeuroImage: Clinical*, 2018. Vol. 17, pp. 232—240. DOI:10.1016/j.nicl.2017.10.014
15. Araújo S. et al. Electrophysiological correlates of impaired reading in dyslexic pre-adolescent children. *Brain and cognition*, 2012. Vol. 79, no. 2, pp. 79—88. DOI:10.1016/j.bandc.2012.02.010
16. González-Garrido A.A. et al. ERP Effects of Word Exposure and Orthographic Knowledge on Lexical Decisions in Spanish. *Journal of Behavioral and Brain Science*, 2015. Vol. 5, no. 6, pp. 185—193. DOI:10.4236/jbbs.2015.56019
17. Yang C.L. et al. ERP indicators of L2 proficiency in word-to-text integration processes. *Neuropsychologia*, 2018. Vol. 117, pp. 287—301. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2018.06.001
18. Osterhout L. et al. Event-related Potentials as Metrics of Foreign Language Learning and Loss. In Schmid M.S., Köpke B. (eds.), *The Oxford handbook of language attrition*. Oxford: Oxford University Press, 2019, pp. 403—416.
19. Brem S. et al. Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence. *Neuroimage*, 2006. Vol. 29, no. 3, pp. 822—837. DOI:10.1016/j.neuroimage.2005.09.023
20. Faisca L., Reis A.I.D., Araújo S. Early brain sensitivity to word frequency and lexicality during reading aloud and implicit reading. *Frontiers in Psychology*, 2019. Vol. 10, article ID 830, 13 p. DOI:10.3389/fpsyg.2019.00830
21. Friedrich M., Friederici A.D. Maturing brain mechanisms and developing behavioral language skills. *Brain and Language*, 2010. Vol. 114, no. 2, pp. 66—71. DOI:10.1016/j.bandl.2009.07.004
22. Gómez-Velázquez F.R., González-Garrido A.A., Vega-Gutiérrez O.L. Naming abilities and orthographic recognition during childhood an event-related brain potentials study. *International Journal of Psychological Studies*, 2013. Vol. 5, no. 1, pp. 55—68. DOI:10.5539/ijps.v5n1p55
23. Holcomb P.J., Coffey S.A., Neville H.J. Visual and auditory sentence processing: A developmental analysis using event-related brain potentials. *Developmental Neuropsychology*, 1992. Vol. 8, no. 2—3, pp. 203—241. DOI:10.1080/87565649209540525
24. Huettig F., Pickering M.J. Literacy advantages beyond reading: Prediction of spoken language. *Trends in cognitive sciences*, 2019. Vol. 23, no. 6, pp. 464—475. DOI:10.1016/j.tics.2019.03.008
25. Kimppa L. et al. Impaired neural mechanism for online novel word acquisition in dyslexic children. *Scientific reports*, 2018. Vol. 8, no. 1, pp. 1—12. DOI:10.1038/s41598-018-31211-0
26. Schulz E. et al. Impaired semantic processing during sentence reading in children with dyslexia: combined fMRI and ERP evidence. *Neuroimage*, 2008. Vol. 41, no. 1, pp. 153—168. DOI:10.1016/j.neuroimage.2008.02.012
27. Kutas M., Federmeier K.D. Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual review of psychology*, 2011. Vol. 62, pp. 621—647. DOI:10.1146/annurev.psych.093008.131123
28. Araújo S. et al. Lexical and sublexical orthographic processing: An ERP study with skilled and dyslexic adult readers. *Brain and Language*, 2015. Vol. 141, pp. 16—27. DOI:10.1016/j.bandl.2014.11.007
29. Dowd A.J. et al. Lifewide learning for early reading development. *New directions for child and adolescent development*, 2017. Vol. 2017, no. 155, pp. 31—49. DOI:10.1002/cad.20193
30. McLaughlin J., Osterhout L., Kim A. Neural correlates of second-language word learning: Minimal instruction produces rapid change. *Nature neuroscience*, 2004. Vol. 7, no. 7, pp. 703—704. DOI:10.1038/nn1264
31. Hasko S. et al. N300 indexes deficient integration of orthographic and phonological representations in children with dyslexia. *Neuropsychologia*, 2012. Vol. 50, no. 5, pp. 640—654. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2012.01.001
32. Lindau T.A. et al. N400 analysis of semantic processing in children aged zero to six years: a literature review. *Revista CEFAC: Atualizacao Cientifica em Fonoaudiologia e Educacao*, 2017. Vol. 19, no. 5, pp. 690—702. DOI:10.1590/1982-0216201719513517
33. Wang E. et al. N400 and P600 effect of chinese words recognition. *NeuroQuantology*, 2017. Vol. 15, no. 4, pp. 76—83. DOI:10.14704/nq.2017.15.4.1172

34. Bühler J.C. et al. Neural processes associated with vocabulary and vowel-length differences in a dialect: An ERP study in pre-literate children. *Brain topography*, 2017. Vol. 30, no. 5, pp. 610—628. DOI:10.1007/s10548-017-0562-2
35. Helenius P. et al. Neural processing of spoken words in specific language impairment and dyslexia. *Brain*, 2009. Vol. 132, no. 7, pp. 1918—1927. DOI:10.1093/brain/awp134
36. Eberhard-Moscicka A.K. et al. Neurocognitive mechanisms of learning to read: print tuning in beginning readers related to word-reading fluency and semantics but not phonology. *Developmental science*, 2015. Vol. 18, no. 1, pp. 106—118. DOI:10.1111/desc.12189
37. Bakos S. et al. Neurophysiological correlates of word processing deficits in isolated reading and isolated spelling disorders. *Clinical Neurophysiology*, 2018. Vol. 129, no. 3, pp. 526—540. DOI:10.1016/j.clinph.2017.12.010
38. Okumura Y., Kita Y., Inagaki M. Pure and short-term phonics-training improves reading and print-specific ERP in English: A case study of a Japanese middle school girl. *Developmental neuropsychology*, 2017. Vol. 42, no. 4, pp. 265—275. DOI:10.1080/87565641.2017.1334784
39. Perfetti C.A., Wlotko E.W., Hart L.A. Word learning and individual differences in word learning reflected in event-related potentials. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 2005. Vol. 31, no. 6, pp. 1281—1292. DOI:10.1037/0278-7393.31.6.1281
40. Kemény F. et al. Print-, sublexical and lexical processing in children with reading and/or spelling deficits: an ERP study. *International Journal of Psychophysiology*, 2018. Vol. 130, pp. 53—62. DOI:10.1016/j.ijpsycho.2018.05.009
41. Bermúdez-Margaretto B. et al. Repeated exposure to “meaningless” pseudowords modulates LPC, but not N (FN) 400. *Brain topography*, 2015. Vol. 28, no. 6, pp. 838—851. DOI:10.1007/s10548-014-0403-5
42. Sacchi E., Laszlo S. An event-related potential study of the relationship between N170 lateralization and phonological awareness in developing readers. *Neuropsychologia*, 2016. Vol. 91, pp. 415—425. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2016.09.001
43. Sánchez-Vincitore L.V., Avery T., Froud K. Word-related N170 responses to implicit and explicit reading tasks in neoliterate adults. *International Journal of Behavioral Development*, 2018. Vol. 42, no. 3, pp. 321—332. DOI:10.1177/0165025417714063
44. Sauseng P., Bergmann J., Wimmer H. When does the brain register deviances from standard word spellings? — An ERP study. *Cognitive Brain Research*, 2004. Vol. 20, no. 3, pp. 529—532. DOI:10.1016/j.cogbrainres.2004.04.008
45. Loberg O. et al. Semantic anomaly detection in school-aged children during natural sentence reading—A study of fixation-related brain potentials. *PloS one*, 2018. Vol. 13, no. 12, 27 p. DOI:10.1371/journal.pone.0209741
46. Rasamimanana M. et al. Semantic compensation and novel word learning in university students with dyslexia. *Neuropsychologia*, 2020. Vol. 139, 13 p. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2020.107358
47. Kallioinen P. et al. Semantic processing in deaf and hard-of-hearing children: Large N400 mismatch effects in brain responses, despite poor semantic ability. *Frontiers in psychology*, 2016. Vol. 7, article ID 1146, 10 p. DOI:10.3389/fpsyg.2016.01146
48. Pijnacker J. et al. Semantic processing of sentences in preschoolers with specific language impairment: Evidence from the N400 effect. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 2017. Vol. 60, no. 3, pp. 627—639. DOI:10.1044/2016\_JSLHR-L-15-0299
49. Rüsseler J. et al. Semantic, syntactic, and phonological processing of written words in adult developmental dyslexic readers: an event-related brain potential study. *BMC neuroscience*, 2007. Vol. 8, no. 52, 10 p. DOI:10.1186/1471-2202-8-52
50. Cavalli E. et al. Spatiotemporal reorganization of the reading network in adult dyslexia. *Cortex*, 2017. Vol. 92, pp. 204—221. DOI:10.1016/j.cortex.2017.04.012
51. Tanner D., Grey S., van Hell J.G. Dissociating retrieval interference and reanalysis in the P600 during sentence comprehension. *Psychophysiology*, 2017. Vol. 54, no. 2, pp. 248—259. DOI:10.1111/psyp.12788
52. Maurer U. et al. The development of print tuning in children with dyslexia: Evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI. *Neuroimage*, 2011. Vol. 57, no. 3, pp. 714—722. DOI:10.1016/j.neuroimage.2010.10.055
53. Galperina E.I. et al. The Development of Words and Sentences Processing: ERP Study in 9-13 Years Old Children [Elektronnyi resurs]. In Shcherbakova O., Shtyrov Y. (eds.), *Neurobiology of Speech and Language. Proceedings of the 2nd International Workshop «Neurobiology of Speech and Language». The Laboratory of Behavioural Neurodynamics, Saint Petersburg State University*. St. Petersburg: Scythia-print, 2018, 64 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36656783> (Accessed 15.06.2020).
54. Hasko S. et al. The time course of reading processes in children with and without dyslexia: an ERP study. *Frontiers in human neuroscience*, 2013. Vol. 7, article ID 570, 19 p. DOI:10.3389/fnhum.2013.00570
55. Wray A.H., Weber-Fox C. Specific aspects of cognitive and language proficiency account for variability in neural indices of semantic and syntactic processing in children. *Developmental cognitive neuroscience*, 2013. Vol. 5, pp. 149—171. DOI:10.1016/j.dcn.2013.03.002
56. Strotseva-Feinschmidt A. et al. Young children’s sentence comprehension: Neural correlates of syntax-semantic competition. *Brain and cognition*, 2019. Vol. 134, pp. 110—121. DOI:10.1016/j.bandc.2018.09.003
57. Yurchenko A., Lopukhina A., Dragoy O. Meaning relatedness in polysemous and homonymous words: an ERP study in Russian: basic research program working papers. Higher School of Economics Research Paper No. WP BRP. Moscow: National Research University Higher School of Economics, 2018. Vol. 67, 15 p. DOI:10.2139/ssrn.3291173

**Информация об авторах**

*Ребрейкина Анна Борисовна*, кандидат биологических наук, научный сотрудник, лаборатория высшей нервной деятельности человека, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИНВД и НФ РАН), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5714-2040>, e-mail: [anna.rebreikina@gmail.com](mailto:anna.rebreikina@gmail.com)

*Ларионова Екатерина Владимировна*, младший научный сотрудник лаборатории высшей нервной деятельности человека, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИНВД и НФ РАН), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3637-1343>, e-mail: [larionova.ekaterin@gmail.com](mailto:larionova.ekaterin@gmail.com)

*Мартынова Ольга Владимировна*, доктор философских наук, Заведующая лабораторией высшей нервной деятельности человека, Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук (ИНВД и НФ РАН), г. Москва, Российская Федерация, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-2893>, e-mail: [omartynova@ihna.ru](mailto:omartynova@ihna.ru)

**Information about the authors**

*Anna B. Rebreikina*, PhD in Biology, Researcher, Laboratory of Human Higher Nervous Activity, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow, Russia, [anna.rebreikina@gmail.com](mailto:anna.rebreikina@gmail.com)

*Ekaterina V. Larionova*, Junior Researcher, Laboratory of Human Higher Nervous Activity, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow, Russia, [larionova.ekaterin@gmail.com](mailto:larionova.ekaterin@gmail.com)

*Olga V. Martynova*, Doctor of Philosophy, Head of the Laboratory, Laboratory of Human Higher Nervous Activity, Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, Moscow, Russia, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9047-2893>, e-mail: [omartynova@ihna.ru](mailto:omartynova@ihna.ru)

Получена 01.04.2020

Принята в печать 16.06.2020

Received 01.04.2020

Accepted 16.06.2020