

УДК 612.821,612.789

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА ОВЛАДЕНИЯ ЧТЕНИЕМ. ЧАСТЬ II

© 2022 г. Е. И. Гальперина^{1, 2, *}, Ж. В. Нагорнова^{1, 2},
Н. В. Шемякина^{1, 2}, А. Н. Корнев^{1, **}

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

²ФГБУН Институт эволюционной физиологии и биохимии имени И.М. Сеченова РАН,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: galperina-e@yandex.ru

**E-mail: k1949@yandex.ru

Поступила в редакцию 20.07.2021 г.

После доработки 25.08.2021 г.

Принята к публикации 27.08.2021 г.

Слово — это минимальная семантически значащая единица речи. На начальной стадии овладения чтением распознавание слов происходит преимущественно на сублексическом уровне. Данный обзор является продолжением первой части, в которой рассматривались психофизиологические механизмы звукобуквенной ассоциации, формирование сенситивности к шрифтам на начальном этапе овладения навыком чтения. Во второй части обзора описываются исследования механизмов восприятия целых слов в сопоставлении с псевдословами или цепочкой псевдошрифтов. Обсуждаются этапы формирования у детей сублексических механизмов чтения: рекодирования и декодирования, описываются физиологические корреляты процессов селективности и сенситивности к шрифтам и печатным словам. В обзор включены психофизиологические исследования с использованием методов: связанных с событиями потенциалов, функциональной магнитно-резонансной томографии и магнитоэнцефалографии — ССП-, фМРТ- и МЭГ-исследования структурно-функционального обеспечения чтения у детей 4–10 лет.

Ключевые слова: чтение, нейрофизиология, психолингвистика, ССП, фМРТ, рекодирование, декодирование, дети, начальный этап усвоения чтения, слова, псевдослова, псевдошрифты.

DOI: 10.31857/S0131164622030067

Усвоение чтения слов

Как в человеческой культуре, так и в процессе освоения грамоты центральное положение занимает слово. Слово — это минимальная семантически значащая единица речи. При освоении устной речи и в ходе спонтанного овладения чтением ребенок, в первую очередь, запоминает сегменты речи (устной или письменной), которые прямо соотносятся с предметами или явлениями окружающего мира. В освоении грамоты это соответствует стадии т.н. логографического чтения [1], когда дети, еще не зная алфавита, запоминают некоторое количество часто встречающихся в их опыте слов, соотносящихся с понятной им семантикой. Это своеобразное синтетическое “чтение” преимущественно однословных текстовых конструкций. На этапе освоения ребенком алфавита продолжительностью от нескольких месяцев до 1–2 лет [2], ребенок опирается при чтении в основном на рекодирование. При этом распозна-

вание слов обычно происходит на сублексическом уровне. Одновременно он распознает каждую букву, соотнося ее с релевантным звуком/фонемой/аллофоном, а потом, интегрируя ряд полученных фонологических продуктов осуществляет синтез фонологического слова (или неслова, в экспериментальной ситуации). Как показали материалы исследований русскоговорящих детей, позже оперативной единицей чтения (ОпЕЧ) становится слог (как на уровне зрительного распознавания, так и в соотношении с фонологией) [3, 4]. Это соответствует этапу орфографического чтения по U. Frith [1] или синтетического чтения по Т.Г. Егорову [5]. На этом этапе происходит укрупнение доминирующих у ребенка ОпЕЧ: отдельные буквы → слоги типа СГ/ГС → слоги типа ССГ → слоги типа СГС → слоги типа ССГС [3, 4]. Спустя еще некоторое время дети приобретают способность узнавать короткие знакомые слова целостно, синтетически. В указанных переходах и смене ОпЕЧ принципиально важной яв-

ляется автоматизация навыков, соответствующих каждой этапной ОпЕЧ, т.е. группе слогов этой степени комплексности.

Исследования механизмов чтения в психологии, психолингвистике и психофизиологии привели к появлению моделей декодирования — описательных или объясняющих [3, 6–8]. Большинство из них были выработаны на материале английского языка, т.е. в них учитывается наличие орфографически регулярных и нерегулярных слов и акцент делается на прочтении односложных слов [9].

При всем разнообразии предложенных когнитивных моделей в большинстве из них фигурируют два главных механизма декодирования: 1) графическое слово → рекодирование → фонологическое слово → лексический доступ, и 2) графическое слово → лексический доступ [10, 11]. Последний называют механизмом прямого доступа, т.е. непосредственного соотнесения графического/орфографического слова с его значением, что происходит с высокочастотными печатными словами, которые читающий помнит. Подобные модели были названы моделями двух маршрутов [12, 13]. Непрямой маршрут предполагает мысленное озвучивание читаемого слова, воссоздание его фонологической формы. Относительно прямого, более короткого маршрута первоначально предполагалось, что в памяти хранятся зрительные образы графических слов и их значений. В более поздних версиях этих моделей предполагается, что в памяти хранятся орфографические инварианты, концепты, с которыми ассоциированы их значения [10, 14].

В сравнительно немногочисленных нейрокогнитивных исследованиях формирования церебрального обеспечения в процессе усвоения навыка чтения слов были обнаружены изменения мозговой активности (интенсивности и топографии *BOLD*-сигнала). Как и в исследованиях усвоения звукобуквенных ассоциаций, эти изменения описываются двояко: 1) как показатели роста чувствительности (*coarse tuning*) мозговых структур к восприятию слов по сравнению со случайным рядом букв (*letter string*) или 2) как показатели селективности реакций на слова по сравнению с квазисловами или несловами (*fine tuning*) [15]. По мнению исследователей, чувствительность в реакциях мозга на печатные слова формируется очень рано и быстро достигает уровня взрослых, а селективность, напротив, формируется медленно и приближается к уровню взрослых лишь после 10 лет [16] и даже к 14 годам [17].

Исследования, проведенные в блоковой парадигме фМРТ

В лонгитюдном исследовании [18] у детей 6 лет тестировали активность области зрительного распознавания слов (*VWFA*) в ответ на изображения домов, объектов, лиц, тел, чисел и слов 7 раз на протяжении года: до начала обучения и во время обучения в 1 классе. Достоверное превышение активности на слова по сравнению с цифрами у детей появилось лишь в третьем и четвертом повторениях (т.е. на 2–4 месяце обучения в школе) в префронтальной и височной коре левого полушария. Было замечено, что в ходе обучения на слова у детей начинали реагировать новые участки коры, ранее слабо специализированные, расположенные рядом с областью, ответственной за восприятие лиц.

S. Brem et al. [19] исследовали детей с использованием функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) до и после тренировочных занятий (3–4 часа) с помощью компьютерной игровой программы Графогейм, стимулирующей освоение звукобуквенных ассоциаций. До тренировки предъявление слов и цепочек псевдошрифтов вызывали повышение мозговой активности билатерально, но преимущественно в вентральной части задней височно-затылочной области. После короткой тренировки произошло увеличение активности (при анализе всего мозга) в задней части левой фузиформной извилины, правой нижней височной извилине и клине.

В исследовании *M. Ben-Shachar et al.* [20] было выяснено, что у детей 6.5 лет в процессе овладения чтением возрастает чувствительность к письменным словам, что проявляется в активности в задней части левой височно-затылочной борозды рядом с *VWFA*. Статистический анализ показал, что уровень чувствительности к словам достоверно коррелирует с успешностью глобального чтения слов (*sight word reading*).

В лонгитюдном исследовании *H. Li et al.* [21] у детей 5–6 лет при решении задачи “подбор парных слов”, которые предъявлялись последовательно (*word matching task*) была зарегистрирована активность (контраст — фиксация на кресте) во фронтальной области билатерально, верхней теменной области билатерально, левой нижней теменной дольке и обоих полушариях мозжечка. Корреляционный анализ показал, что левые дольки VII и VIII отрицательно коррелируют с уровнем навыков чтения в момент исследования, а правая долька VIII положительно связана с уровнем навыков чтения через 1 год.

Исследования фМРТ по протоколу вызванных ответов

В фМРТ-исследовании *K. Chyl et al.* [22] с использованием протокола связанных с событиями потенциалов (ССП-протокола) сравнивали мозговую активность в ответ на предъявление слов у дошкольников (возраст 79 мес.) и первоклассников (81 мес.). У дошкольников, находящихся на добукварном этапе, уровень активации не различался в словах и цепочках символов: была отмечена активность только в левой хвостатой и медиальной затылочно-височной извилине. У начинающих читателей имплицитное чтение слов вызывало вовлечение высших отделов мозга, связанных с обработкой языковых структур (т.е. это был эффект сенситивности, контраст слова > цепочек символов): в *IFG* (нижней лобной извилине), прецентральных и постцентральных извилинах. Большая вовлеченность этих структур (в частности *IFG*), была связана с фонологическим рекодированием во время чтения [23] и, по мнению авторов, высшими формами (*top-down*) когнитивного контроля, связанного с чтением [24].

Процесс освоения чтения подразумевает взаимодействие подсистем распознавания устной речи и подсистем распознавания визуальных структур. В серии фМРТ-исследований с использованием SSP-протокола [25, 26] были выявлены некоторые церебральные корреляты такого взаимодействия (*print-speech coactivation*). Детям 8.5 лет предлагалась задача соотнесения парных бимодальных стимулов (картинка – устное слово/ письменное слово) с оценкой их конгруентности. Достоверный уровень коактивации речевых и визуальных подсистем мозга при чтении слов в таких структурах, как нижние лобные извилины билатерально, левая нижнетеменная кора и фузиформная извилина, оказался надежным предиктором сформированности навыков чтения, оцененных у тех же детей через 2 года [25].

В МЭГ-исследовании детей 7–8 лет авторам удалось зарегистрировать временные и топические характеристики активности мозга, связанные с обработкой неспецифических и специфических характеристик зрительно предъявленных слов [27]. Раньше по времени начиналась обработка неспецифических характеристик слов с локализацией активности в затылочной коре, далее следовала активность, связанная со специфическими характеристиками шрифта в левой височно-затылочной коре, и следом повышалась активность в височной коре. Аналогичные результаты были получены и у взрослых [28], но сравнение показало, что у детей отмечалось значительное запаздывание временных характеристик, возрастающее от затылочной в направлении к височно-затылочной и височной коре. По мнению *A. Tarkiainen et al.* [28], полученные ре-

зультаты отражают незрелость у детей нейронных структур, участвующих в переходе от визуального анализа низкого уровня к высшим его формам, участвующим в восприятии письменных слов.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о том, что на ранней стадии освоения чтения у детей активность вентральной части левой височно-затылочной извилины возрастает по мере накопления опыта и совершенствования навыка [19, 29] и рост активности коррелирует с совершенствованием распознавания слов при чтении [20]. Однако у лиц с высоким уровнем читательских навыков активность той же зоны убывает с ростом знакомости с предъявляемыми стимулами и орфографией [30, 31]. То же относится и к словам с большей лексической частотностью [30]. Связь характера активности вентральной части левой теменно-височной коры и роста читательского опыта показана во многих исследованиях, но ее интерпретация остается дискуссионной.

Одно из объяснений вышеприведенных данных заключается в том, что в ходе обучения ребенка чтению фузиформная кора левого полушария, ее средняя часть, становится избирательно более чувствительной к знакомым орфографическим структурам [18, 32]. Некоторые ученые в своих выводах идут дальше и предполагают, что эффекты знакомости орфографической, фонологической и семантической проявляются у детей независимо друг от друга [30]. Исследователи признают, что эта мозговая структура специализирована относительно целостной обработки орфографической структуры целого слова (как лексем) [30, 33–35].

Эффект повышения сенситивности в ходе обучения показан в ряде работ с использованием сочетания методов SSP и фМРТ в группе *S. Brem et al.* [19]. Так, в исследовании, проведенном на 32 нечитающих дошкольниках 6 лет, было показано, что в процессе тренировки соотнесения зрительно предъявленных и услышанных слов, в задних затылочно-височных отделах коры повышается амплитуда раннего компонента N1, а также изменяется *BOLD*-сигнал на предъявление слов по сравнению с предъявлением псевдоширифтов [19]. Аналогично, после экспериментального обучения искусственному алфавиту (для контроля читательского индивидуального опыта испытуемых) значительно возросла сенситивность фузиформной и нижней височной извилин билатерально и области клина [19].

ЭЭГ-исследования с SSP-протоколом

В исследованиях электрической активности мозга так же, как и в фМРТ-исследованиях, были обнаружены маркеры настройки мозговых структур к восприятию слов. Они выражаются в волно-

Таблица 1. Результаты фМРТ и МЭГ-исследований навыков чтения слов на ранних этапах

| Источник | Возрастной состав испытуемых | Виды стимулов | Задание | Используемые контрасты | Обнаруженные эффекты |
|-------------------------------------|--|--|--|--|--|
| <i>Sentanni et al.</i> , 2017 [17] | Дети с нормальным развитием: 7–14 лет (средний возраст 10.27 ± 1.78). Взрослые (22.34 ± 3.26 лет) | Точечные рисунки слов (существительные, 3–8 букв); лиц; объектов; случайные линии (зрительный шум) | Нажимать на кнопку, если предъявленный стимул зеленого цвета | Контрасты: “Слова” vs “Лица”; “Слова” vs “Объекты” | В контрасте на сенситивность (слова > лица) нет различий между детьми и взрослыми в активации области зрительных образов слов. В контрасте на специфичность (слова > объекты) выявлено наличие специфичности у взрослых и отсутствие у детей |
| <i>Preston et al.</i> , 2016 [25] | Дети, $n = 68$, 6–10 лет при первом наблюдении. T1: 8.5 ± 1.2 лет. T2: 10.5 ± 1.3 лет | Слова (написанные и произнесенные); псевдослова (написанные и произнесенные) | Задание на идентификацию изображения, 20% совпадающих проб, 80% несовпадающих проб | Анализ коактивации на предъявлении печатного и речевого стимула | Данные о коактивации на предъявление печатного и устного стимула лучше предсказывают навыки чтения (через 2 года), чем только печатного/устного стимула. Эффекты коактивации наблюдались в нижней лобной извилине билатерально, левой нижней теменной коре и веретенообразной извилине |
| <i>Parvainen et al.</i> , 2006 [27] | МЭГ-исследование. Дети с нормальным развитием 7.2–8 лет, $n = 18$ (8 м/10 д) | Слова из 4-х букв; три уровня зашумленности изображения; последовательности неязыковых символов без зашумления; целевая последовательность (содержит контурные изображения животных) | Нажимать на кнопку, если предъявляется целевая последовательность символов (содержащая изображения животных) | “Слова (незашумленные)” vs “Символы”; “Слова (незашумленные)” vs “Слова (зашумленные)” | Активация, отражающая неспецифический визуальный анализ, у детей (как и у взрослых) локализована в затылочной коре (90–360 мс (медиана 140 мс)). Сенситивная к последовательно-ности букв активация наблюдается позже в левой затылочно-височной коре (135–280 мс (медиана 205 мс)) и, далее, в височной коре (257–630 мс (медиана 465 мс)). Выраженность сенситивной к последовательности букв активации в затылочно-височной коре (выявлена у 10 детей из 18) коррелирует с фонологическими навыками |

Таблица 1. Продолжение

| Источник | Возрастной состав испытуемых | Виды стимулов | Задание | Использованные контрасты | Обнаруженные эффекты |
|---|---|--|--|---|---|
| <p><i>Dehaene-Lam-bertz et al.</i>, 2018 [18]</p> | <p>Дети с нормальным развитием от 5 лет 7 мес. до 6 лет 7 мес. (средний возраст 6.2 лет). 6 наблюдений через 2 мес. в течение учебного года. 8 детей – седьмая сессия (через год после 6-й)</p> | <p>Изображения: дома; объекты; лица; тела; слова (4 буквы); числа (4 цифры); зрительный шум (высокочастотный и низкочастотный растр)</p> | <p>Нажимать на кнопку, если появляется изображение рисованного персонажа (Уолли)</p> | <p>“Дома” vs “Отдых”, “Объекты” vs “Отдых”; “Лица” vs “Отдых”; “Тела” vs “Отдых”; “Слова (4 буквы)” vs “Отдых”; “Числа (4 цифры)” vs “Отдых”; “Зрительный шум” vs “Отдых”</p> | <p>С развитием навыка чтения в области зрительных образов слов на предъявление слов начинают реагировать участки, которые были “слабо специализированы” для восприятия объектов и расположены близко к зонам распознавания лиц (но не идентичны им). Данные области сохраняют реакцию и на объекты, но в большей степени начинают активироваться при предъявлении слов (что дополняет первоначальную <i>recycling</i> гипотезу)</p> |
| <p><i>Brem</i>, 2010 [19]</p> | <p>Дети 6.5 ± 0.3 лет, исследования до и после тренинга на соотнесение графем и фонем</p> | <p>Слова (аудиально, визуально); псевдошрифты</p> | <p>Задача на определение модальности (аудиальная, визуальная) предъявленного стимула</p> | <p>“Слова” vs “Псевдошрифт”</p> | <p>После тренировки соотнесения графем и фонем увеличивается активность в контрасте “слова” > “ложный шрифт” в веретенообразной извилине и клине ЛПП, а также в веретенообразной, нижней височной извилинах и клине ПП</p> |
| <p><i>Ben-Shachar et al.</i>, 2011 [20]</p> | <p>Дети 7–12 лет, 4 ежегодных наблюдений</p> | <p>Слова (4 буквы, сушественные); 4 уровня видимости, с зашумлением; фиксация взора (зрительный шум)</p> | <p>Определять цвет центральной метки (имплицитное чтение)</p> | <p>“Слова” vs “Зрительный шум”</p> | <p>Увеличение сенситивности к предъявлению слов в левой затылочно-височной борозде, коррелированное с увеличением беглости чтения отдельных слов</p> |

Таблица 1. Окончание

| Источник | Возрастной состав испытуемых | Виды стимулов | Задание | Использованные контрасты | Обнаруженные эффекты |
|--------------------------------|---|---|---|--|--|
| <i>Shyl et al.</i> , 2018 [22] | Дети от 5.51 до 8.06 лет (средний возраст 6.9 ± 0.55): — дошкольники, — ученики 1-го класса | Графические слова; произнесенные слова; графические последовательности символов; преобразованные синтезатором речи слова (с минимумом фонетического содержания) | Инструкция — “Обратить внимание на стимулы”. Нет специального задания | “Слова” vs “Отдых”, “Слова” vs “Символы”, “Слова” vs “Символы”; Коактивация “Слова (графические и произнесенные)” vs “Отдых” | Активация в контрасте “слова” vs “символы” в верхней височной, нижней лобной и веретенообразной извилинах ЛП коррелирует с навыками чтения. Аудиовизуальная коактивация при предъявлении слов наблюдается только в обучающейся чтению группе детей. Данная коактивация в левой верхней височной извилине коррелирует с навыками чтения |
| <i>Rugh et al.</i> , 2013 [26] | Дети 5.47–8.89 лет (средний возраст 7.7 лет) | Однословные слова (аудиально, визуально); однословные псевдослова (аудиально, визуально) | Соотнести целевое изображение с представляемыми на слух или зрительно словами | “Слова (аудиально, визуально)” vs “Фон”; “Псевдослова (аудиально, визуально)” vs “Фон” | Активация при восприятии печатного текста в височных и височно-затылочных областях ЛП, так же как в нижней лобной извилине и системе зрительного внимания коррелировала с показателями чтения. Активация при восприятии устных слов, коррелирующая с навыками чтения, наблюдалась в нижней лобной извилине и предклинье ЛП |
| <i>Li et al.</i> , 2021 [21] | Дети Т1: 5.6–6.6 лет (средний возраст 5.8 лет), дошкольники. Т2: 6.5–7.5 лет (средний возраст 7.1 лет) | Простые частотные слова; фиксация взгляда | Зрительное соотнесение слов | “Слова” vs “Фиксация” | Наблюдается активация мозжечка — билатерально при восприятии печатных слов. Активация в VII и VIII долях ЛП отрицательно коррелировала с текущими показателями чтения. Активация в VII и VIII долях правого полушария положительно коррелировала с показателями чтения, наблюдается через год обучения |

Примечание: фМРТ — функциональная магнитно-резонансная томография, МЭГ — магнитоэнцефалография. ЛП — левое полушарие, ПП — правое полушарие.

вых компонентах N1 и P2, чувствительных к восприятию букв и слов, которые обычно регистрируются в височно-затылочных отделах мозга [36]. Подобно фМРТ-исследованиям, были обнаружены явления сенситивности, грубой настройки (*coarse tuning*) и тонкой настройки, селективности (*fine tuning*) [36–38]. Полагают, что тонкая настройка формируется позже, чем грубая. Так, по мнению *M.I. Posner* [39], даже в 10-летнем возрасте т.н. процессы тонкой настройки (*fine tuning*) еще недостаточно сформированы. По данным *J. Zhao et al.* [15], у детей 8 лет с высоким и низким уровнем показателей чтения псевдослов были обнаружены признаки тонкой настройки (т.е. селективности) мозговых структур при предъявлении слов. Однако другие авторы отмечают значительную индивидуальную вариативность: сенситивность ССП к печатному шрифту обнаруживалась лишь у 57% первоклассников [40].

В ЭЭГ-исследовании *A.K. Eberhard-Moscicka et al.* [41] у детей 7–8 лет были обнаружены признаки селективности в реакции мозга (компонент N1 ССП) на чтение слов по сравнению с псевдословами. Было показано, что к концу первого года обучения у 90% учащихся (средний возраст 7.6 лет) амплитуда компонента N1 в затылочно-височных областях коры выше на предъявляемые слова по сравнению с символами. Авторы утверждают, что грубая настройка чувствительности к шрифту, т.н. *coarse print tuning*, уже сформирована к концу первого года обучения, тогда как *Lexicality-effect*, определяемый как разница амплитуд при сравнении слов и псевдослов, в этом возрасте еще не выражен.

U. Maurer et al. [37, 42] провели серию ЭЭГ-исследований с детьми дошкольного возраста, учениками 2 класса и взрослыми. Сравнивали параметры ССП на предъявление слов, неслов и ряда букв (*letter string*). У дошкольников ССП на слова не имели достоверных отличий от ряда букв и неслов, в то время как у учеников 2 класса такие различия были обнаружены по компоненту N1: амплитуда N1 компонента ССП на слова имела большую амплитуду, чем на ряд букв (эффект сенситивности) и псевдослова (лексический эффект, т.е. селективность). Однако селективность по амплитуде была значительно слабее выражена, чем сенситивность. Кроме количественных характеристик амплитуды возрастные различия проявлялись и в топографии распределения мощности потенциалов в разных отделах мозга, что свидетельствует, по мнению авторов, об изменениях нейросетей в процессе обучения чтению. Авторы отмечают, что N1-эффект следовал у здоровых детей нелинейной кривой развития: он увеличивался между дошкольным возрастом и 2 классом [43] и редуцировался в диапазоне между 2 и 5 классом. Так называемый лексический эффект (различия слово/псевдослово) по N1

компоненту не обнаруживался у взрослых, т.е. ранний зрительный компонент нелинейно (следя перевернутой U-образной кривой) менялся с возрастом и ростом читательского опыта. Такой характер зависимости этого компонента от опыта подтверждается более поздними работами [44, 45].

В ЭЭГ-исследовании, выполненном на группах учащихся 3 класса с дислексией и без проблем чтения [46], регистрировали ССП на слова (длинные и короткие) и серии небуквенных символов (длинные и короткие). У испытуемых обеих групп были обнаружены признаки сенситивности, выражавшиеся в волновом компоненте P1 (пик 127 мс) на предъявление слов (особенно длинных), в теменно-затылочных областях, более выраженные в левом полушарии по сравнению с ССП на ряды символов.

Появление компонента N1 в онтогенезе связывают с обучением грамоте – чувствительность этого компонента к шрифту отсутствует у нечитающих детей и довольно быстро появляется в процессе обучения чтению [19, 43, 47, 48], даже после короткой тренировки ассоциации графем и фонем [19, 48] и снижена у дислексиков [44, 46, 47, 49, 50]. Чувствительность компонента N1 к различиям реальных и псевдошрифтов выявляется как у детей с дислексией, так и у детей контрольной группы [47, 51] – амплитуда на предъявление реального шрифта выше, однако эффект больше выражен у детей без проблем чтения. Дефинитивного уровня, характерного для взрослых, паттерн N1 достигает довольно поздно в школьном обучении, в подростковом периоде [36, 49]. *M.I. Posner et al.* [39] показали, что амплитуда N170 отличается при предъявлении слов и последовательностей согласных в возрасте 10 лет, и не отличается в 4 и 7 лет.

Сходное физиологическое значение приписывают также положительному компоненту P1 (50–150 мс) [42, 47, 52]. Чувствительность компонента P1 к шрифту выражается в его сниженной, по сравнению с символами, амплитуде [42, 47], эффект не наблюдается у дошкольников [42], проявляется только после начала обучения чтению, хуже выражен у детей с дислексией [42, 47, 53]. *B. Milivojevic* [54] полагает, что компонент P1 отражает низкоуровневые процессы зрительной обработки, тогда как N170 (N1) связан с процессами категоризации/классификации.

Компонент P2, локализуемый в задних областях коры, не часто упоминается как специфический для обработки зрительных слов, например [55], в основном, в аспекте зрительного компонента декодирования. Упоминается, что у взрослых компонент P2 более чувствителен к ситуации затрудненного или невозможного распознавания зрительных стимулов (неправильные слова, цепочки символов, псевдошрифты), вызывая уве-

личение амплитуды сравнительно с обычными словами [56]. У детей в классической работе *P.J. Holcomb et al.* [57] показаны более ранние и меньшие по амплитуде компоненты P2 в ситуации неконгруэнтных окончаний слов по сравнению с конгруэнтными. В работе *G. Fraga-González et al.* [46] P2 волновой компонент (пик 341 мс) показал небольшое увеличение позитивности и сокращение латентности на слова по сравнению с цепочками символов. У детей 3–5 класса данный компонент имел большую амплитуду на псевдошрифты, чем на цепочки букв, отражая процессы грубой настройки, как показано в работе *D. Coch et al.* [36].

Компонент N300 впервые описан у взрослых, имеет пик от 300 до 350 мс (N300), регистрируется при выполнении заданий, требующих сопоставления орфографических и фонологических представлений, например, совпадение предъявляемых слов по ритму [58–60]. У взрослых он представлен в лобных, височно-теменных областях в основном левого полушария [58]. По сравнению со взрослыми, у детей пик отстает по времени примерно на 100 мс [60]. Топография данного компонента у детей примерно соотносится с таковой у взрослых, однако имеет особенности у дислексиков по сравнению с контрольной группой: при сопоставлении фонологической и орфографической информации у детей с дислексией выявляется более билатеральное распределение данного компонента, тогда как у сверстников контрольной группы — больше в лобно-височных отделах левого полушария [61]. Степень левосторонней латерализации компонента положительно коррелирует со скоростью чтения. Особенности компонента N320 у детей с дислексией показаны также при сопоставлении заданий на чтение псевдослов и бессмысленных наборов согласных: амплитуда N320 для согласных больше, чем для псевдослов, как у дислексиков, так и у детей с нормой чтения, однако у последних эффект выражен сильнее [49].

Детали описанных выше работ приводятся в табл. 1 и 2.

По мнению *S. Dehaene* [62], освоение новых для головного мозга функций (ранее не востребованных в естественной среде обитания) предполагает использование тех структур мозга, функциональная специализация которых близка природе новых задач. Наглядным примером такой структуры может быть фузиформная извилина, которая первично функционально связана с распознаванием графических изображений и лиц, но в процессе обучения чтению принимает на себя новую функцию — распознавание и запоминание орфографического образа слов [62, 63]. По мнению *A.C. Vogel* [64], функциональная роль этой области мозга связана, по меньшей мере, с

двумя обстоятельствами. Одно из них — это функциональные возможности определенных структур мозга. Эксперименты показали, что нижняя височно-затылочная область функционально способна обрабатывать сложные комплексы графических изображений: не только буквы, но и псевдошрифты. Второе — это то, что *VWFA* имеет богатые функциональные связи с дорзальной сетью внимания (*attention dorsal stream*), функционально связанной с пространственной организацией внимания, и другими структурами, участвующими в когнитивном контроле.

Новые научные данные, полученные в исследованиях мозговой организации начального этапа освоения чтения, позволяют сделать некоторые предварительные обобщения. Их можно свести в две категории: 1) закономерности динамики чувствительности мозговых структур в процессе роста грамотности и опыта знакомства с письменными текстами в первые 3 года обучения и 2) особенности топографии зон активности мозга при восприятии печатных слов. В реакции мозга на буквы знакомого алфавита (одиночные или в цепочке) отмечаются как признаки чувствительности, так и селективности, в то время как при восприятии слов результаты различаются в зависимости от метода исследования. Факты, полученные в фМРТ-исследованиях, подтверждают лишь явления чувствительности при восприятии слов [16, 20–22]. ЭЭГ-исследования указывают как на чувствительность [19, 37, 43], так и на селективность [15].

По мнению ученых, становление процесса специализации мозга на распознавание письма является весьма продолжительным. В то время как специализация на лица в правом полушарии начинает проявляться уже в возрасте 4 мес. [65, 66], специализация левой задней зрительной зоны занимает не менее 10 лет, на протяжении которых практический опыт формирует эффективный механизм чтения, полагают *C. Spironelli* и *A. Angrilli* [60].

В психофизиологии чтения важный вопрос остается предметом дискуссий: существует ли каузальная связь между физиологическими процессами созревания церебральных структур, связей между ними с одной стороны и формированием навыков чтения, опытом чтения (*print exposure*) — с другой. Результаты исследований, приведенные в обзоре, пока не дают возможности однозначно ответить на этот вопрос. Большинство исследований указывают на влияние читательского опыта, обучения на изменения в мозговой активности, вызванные предъявлением стимулов. Многие исследователи согласны в оценке эффектов чувствительности и селективности в височно-затылочной коре и фузиформной извилине в ответ на имплицитное и эксплицитное чтение и роли опыта и освоенности навыков чтения. Однако остается

Таблица 2. Результаты ССП-исследований навыков чтения слов на ранних этапах

| Источник | Возрастной состав | Задания (тест, сравнения) | Стимулы | Компоненты ССП | Локализация | Эффекты результаты |
|--|---|--|---|---|--|---|
| <i>Hasko et al.</i> , 2012 [61] | 1. Дети контрольной группы: 9.5 ± 0.31 лет. 2. Дети с дислексией, 10.95 ± 0.31 лет | Соотнесение визуально и аудиально предъявленных слов (Р-О) и двух последовательно визуально предъявленных слов (О-О) | Слова, выровненные по параметрам длины, частоты, частоты битграмм, числу орфографических соседей | №300 | Лобно-височная область ЛПП у группы контроля, билатерально у детей с дислексией | Амплитуда №300 выше при выполнении фонетико-орфографического (Р-О) сопоставления по сравнению с орфо-орфографическим сопоставлением (О-О). Топографическое распределение отличается между группами |
| <i>Fraga-González et al.</i> , 2014 [46] | 1. Дети контрольной группы: 8.78 ± 0.35 лет. 2. Дети с дислексией 8.97 ± 0.39 лет | Нажатие при повторении стимула | Цепочки из слов (двусложные слова раннего онтогенеза). Цепочки из символов: короткие (4–5 символов), длинные (6–7 символов) | Р1 (пик 127 мс). N1 (пик 223 мс). Р2 (пик 340 мс) | Височно-теменные, теменные затылочные области ЛПП (<i>TP7, P9, P7, P5, PO7, PO3, O1</i>) | Р1 амплитуда выше и лагентность меньше для слов по сравнению с символами. У нормально читающих амплитуда при восприятии коротких символьных цепочек выше, чем длинных, у дислексиков нет такого эффекта. N1 амплитуда выше и лагентность короче для слов по сравнению с символами, у длинных цепочек больше, чем у коротких. Эффект выше в группе контроля. Р2 – небольшое увеличение лагентности и укорочение лагентности на слова по сравнению с цепочками символов |

Таблица 2. Продолжение

| Источник | Возрастной состав | Задания (тест, сравнения) | Стимулы | Компоненты ССП | Локализация | Эффекты результаты |
|---|--|--------------------------------|--|--|--|---|
| <i>Araújo et al.</i> , 2012 [48] | 1. Дети контрольной группы: 10.6 ± 1.7 лет. 2. Дети с дислексией: 10.7 ± 1.6 лет | Нажатие при повторении стимула | Слова (1–2 слога, 3–5 букв) с низкой и высокой частотностью; псевдослова; наборы согласных букв; наборы символов | P1 (110–160 мс). N1 (180–260 мс). N320 (290–360 мс) | Теменные области | Амплитуда P1 для согласных меньше, чем для символов, только у группы контроля. Амплитуда N1 для согласных больше, чем для символов, только у группы контроля. Амплитуда N320 для согласных больше, чем для псевдослов у обеих групп |
| <i>Eberhard-Moscicka et al.</i> , 2015 [41] | Дети с нормальным развитием в конце 1-го года обучения: от 6.7 до 8.5 лет | Нажатие при повторении стимула | Слова из детских текстов для 6–8 лет; псевдослова; последовательности псевдошифтов | N1 | Затылочно-височная область | N1 амплитуда на слова выше, чем на символы у 90% школьников в конце 1-го года обучения. Лексический эффект (разница амплитуд при сравнении слов и псевдослов) в этом возрасте не выражен |
| <i>Maurer et al.</i> , 2007 [47] | 1. Дети контрольной группы. 2. Дети с высоким дислексией. T1 (дошкольный возраст): 6.53 ± 0.4 лет. T2 (2 класс): 8.25 ± 0.3 лет | Нажатие при повторении стимула | Слова; псевдослова; последовательности символов; картинки | P1 (164–272 мс). N1 (273–417 мс) | Затылочно-височная, фронтально-центральная | P1 амплитуда меньше на слова, чем на символы у школьников, амплитуда P1 у дислексиков ниже, чем в контроле. N1 амплитуда на слова выше, чем на символы, но только после обучения чтению, у дислексиков эффект выражен слабее. N1 coarse print tuning |
| <i>Maurer et al.</i> , 2011 [42] | 1. Дети контрольной группы. 2. Дети с дислексией. T1 (2 класс): 8.3 ± 0.4 лет. T2 (5 класс): 11.3 ± 0.4 лет | Нажатие при повторении стимула | Слова; псевдослова; последовательности символов; картинки | P1 (55–155 мс). N1 (156–265 мс). P2 (266–397 мс). P3 (398–843 мс) | Затылочная, фронтально-центральная, теменная | P1 амплитуда меньше на слова, чем на символы в обеих группах в двух возрастах. N1 амплитуда на слова выше, чем на символы как у дислексиков, так и у контроля, эффект выше во 2-м классе, чем в 5-м у контроля, практически не изменяется у дислексиков. P2, P3 – эффект не описан |

Таблица 2. Окончание

| Источник | Возрастной состав | Задания (тест, сравнения) | Стимулы | Компоненты ССП | Локализация | Эффекты результаты |
|-----------------------------|--|---|---|---|--|---|
| Wachinger et al., 2018 [45] | Дети дошкольники (58% с семейным риском дислексии), лонгитюд до 2-го класса школы, 5 раз протестированы в возрасте 6.2; 6.9; 7.2; 7.8; 8.2 лет | Сопоставление зрительно предъявленных и произнесенных слов. Контроль — аналогичное задание с картинкой вместо слова | Слова из 4–5 букв, входящие в словарь начальной школы | Поздний позитивный компонент (LPC) | Левая височная теменная область | У детей контрольной группы амплитуда в интервалах между тестированиями (с ростом читательской компетенции) сначала увеличилась, потом уменьшалась, тогда как у дислексиков — незначимо увеличивалась |
| Sites et al., 2017 [52] | Дети 6–13 лет (средний возраст 8.7). Повторные исследования. Между исследованиями 11–21 мес. (в среднем 13) | Реагировать нажатием на появление слова, обозначающего имя испытываемого (целевой стимул) | Слова (DOG, BUS); псевдослова (PEM, SNELE), акронимы (NBC, W/II), недопустимые буквенные последовательности (NHC, JKNC) | N/P150 (200–270 мс). N250 (350–450 мс). N400 (475–575 мс) | Центральная Cz и центропарietaльная Pz области | Ярко выраженные межсубъектные различия как у взрослых проявились только у детей старше 10 лет: амплитуда N400 на слова и псевдослова выше, чем на акронимы и буквенные последовательности. Межсубъектные различия N/P150 и N250 не выявляются. Амплитуда N/P150, измеренная в 1-й год наблюдений, коррелировала с показателями фонематического слуха и словаря на 2-м году наблюдений. N 250 — с показателями фонематического слуха |

Примечание: ССП — связанные с событиями потенциалы, ЛП — левое полушарие, ПП — правое полушарие.

открытым вопросом: насколько важна степень зрелости соответствующих нейросетей для появления эффектов сенситивности и селективности. *K. Chyl et al.* [67] в обзорной статье, выдвигают предположение, что зрелость нейрофизиологических структур, образующих подсистему чтения, темп миелинизации, с одной стороны, создают необходимые предпосылки для освоения навыка чтения [68], а с другой, взаимодействуя с новым опытом чтения, продолжают свое формирование, расширяясь за счет соседних участков нервных тканей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературы свидетельствует, что полученные новые научные данные изменили представления о механизмах чтения. Усовершенствованные модели церебральных механизмов освоения чтения сместились от модулярных представлений о своеобразной монополизации определенных структур мозга, обслуживающих только определенные функции (например, фузиформная извилина, как центр зрительных образов слов), к процессуально ориентированным мультифункциональным моделям [64]. Например, *S. Deahene et al.* [62] установили, что в ходе обучения специализированными в левой фузиформной извилине становятся те участки нейросети, которые в меньшей степени специализированы к распознаванию других объектов (например, лиц). По мере обучения эти области продолжают активироваться на предъявление объектов, но активация на слова становится выше.

Таким образом, приведенные выше результаты исследования позволяют составить некоторые, еще фрагментарные представления о мозговом обеспечении чтения на начальном этапе его освоения. Пока полученные данные ограничиваются преимущественно функционально-специфичными отделами (*domain-specific*) и значительно меньше сведений об участии структур, связанных с управляющим функциями (*executive functions*) и возрастной динамике системного взаимодействия разных структур мозга. Остались за скобками в настоящем обзоре многочисленные нейроанатомические исследования мозга, исследования структурной и функциональной коннективности [68, 69]. Это может стать предметом последующих обзоров.

Финансирование работы. Работа поддержана РФФИ (грант № 20-113-50340).

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Frith U.* A developmental framework for developmental dyslexia // *Ann. Dyslexia.* 1986. V. 36. № 1. P. 67.
2. *Kornev A.N., Balčiūnienė I., Selezneva M.G., Sorokin A.A.* How to compute reading development strategy? Evidence from Russian-speaking children / *Human Language Technologies – The Baltic Perspective* // FAIA. 2014. V. 268. P. 196.
3. *Корнев А.Н.* Нарушения чтения и письма у детей. 2-е изд. СПб.: Речь, 2003. 330 с.
4. *Корнев А.Н.* Поэтапное формирование оперативных единиц письма и чтения как базовый алгоритм усвоения этих навыков / *Вопросы психологии письма и чтения. Нарушения письма и чтения у детей. Изучения и коррекция.* М.: ООО “ЛОГОМАТ”, 2018. С. 6.
5. *Егоров Т.Г.* Психология овладения навыком чтения. СПб.: изд-во КАРО, 2006. 296 с.
6. *Величковский Б.* Когнитивная наука. Основы психологии познания в 2 т. Т. 2. 2-е изд., испр. и доп. Учебник для бакалавриата и магистратуры. М.: Издательство “Юрайт”, 2018. 386 с.
7. *Корнев А.Н.* Когнитивные механизмы овладения чтением: экспериментальный анализ стратегий рекодирования / *Онтолингвистика – наука XXI века. Материалы международной конференции, посвященной 20-летию кафедры детской речи РГПУ им. А.И. Герцена.* СПб., 2011. С. 246.
8. *Корнев А.Н., Столярова Э.И., Гальперина Е.И., Гуйемар Д.М.* Формирование сенсомоторных механизмов продукции слога на начальном этапе усвоения чтения // *Педиатр.* 2014. Т. 5. № 4. С. 85.
9. *Perfetti C.A., Dunlap S.* Learning to read: General principles and writing system variations. In *Learning to read across languages.* NY and London: Routledge, 2008. P. 25.
10. *Корнев А.Н.* Современные представления о механизмах чтения / VII выездная школа-семинар “Проблемы порождения и восприятия речи”. Череповец, 23–25 октября 2008 г. Издательство: Череповецкий государственный университет, 2008. С. 103.
11. *Корнев А.Н.* Вопросы психологии письма и чтения / *Нарушения письма и чтения у детей: изучение и коррекция.* Цифровая книга. М.: ЛОГОМАТ, 2019. С. 6.
12. *Forster K.I., Chambers S.M.* Lexical access and naming time // *J. Verb. Learn. Verb. Behav.* 1973. V. 12. № 612. P. 627.
13. *Marshall J.C., Newcombe F.* Patterns of paralexia: A psycholinguistic approach // *J. Psycholinguist. Res.* 1973. V. 2. № 3. P. 175.
14. *Coltheart M.* Modeling Reading: The Dual-Route Approach / *The science of reading: A handbook* // Eds. Snowling M.J., Hulme C.E. Oxford: Blackwell Publishing, 2005. P. 6.
15. *Zhao J., Kipp K., Gaspar C. et al.* Fine neural tuning for orthographic properties of words emerges early in children reading alphabetic script // *J. Cogn. Neurosci.* 2014. V. 26. № 11. P. 2431.
16. *McCandliss B.D., Posner M., Givon T.* Brain Plasticity in learning visual words // *Cogn. Psychol.* 1997. V. 33. № 1. P. 88.

17. *Centanni T.M., King L.W., Eddy M.D. et al.* Development of sensitivity versus specificity for print in the visual word form area // *Brain Lang.* 2017. V. 170. P. 62.
18. *Dehaene-Lambertz G., Monzalvo K., Dehaene S.* The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition // *PLoS Biol.* 2018. V. 16. № 3. P. e2004103.
19. *Brem S., Bach S., Kucian K. et al.* Brain sensitivity to print emerges when children learn letter–speech sound correspondences // *PNAS.* 2010. V. 107. № 17. P. 7939.
20. *Ben-Shachar M., Dougherty R.F., Deutsch G.K., Wandell B.A.* The development of cortical sensitivity to visual word forms // *J. Cogn. Neurosci.* 2011. V. 23. № 9. P. 2387.
21. *Li H., Kepinska O., Caballero J.N. et al.* Decoding the role of the cerebellum in the early stages of reading acquisition // *Cortex.* 2021. V. 141. P. 262.
22. *Chyl K., Kossowski B., Dębska A. et al.* Prereader to beginning reader: changes induced by reading acquisition in print and speech brain networks // *J. Child Psychol. Psychiatry.* 2018. V. 59. № 1. P. 76.
23. *Pugh K.R., Frost S.J., Sandak R. et al.* Mapping the word reading circuitry in skilled and disabled readers / *The Neural Basis of Reading* // Eds. Cornelissen P.L., Hansen P.C., Kringelback M.L., Pugh K.R. Oxford University Press, UK, 2010. P. 281.
24. *Pollack C., Luk G., Christodoulou J.A.* A meta-analysis of functional reading systems in typically developing and struggling readers across different alphabetic languages // *Front. Psychol.* 2015. V. 6. P. 191.
25. *Preston J.L., Molfese P.J., Frost S.J. et al.* Print-Speech Convergence Predicts Future Reading Outcomes in Early Readers // *Psychol. Sci.* 2016. V. 27. № 1. P. 75.
26. *Pugh K.R., Landi N., Preston J.L. et al.* The relationship between phonological and auditory processing and brain organization in beginning readers // *Brain Lang.* 2013. V. 125. № 2. P. 173.
27. *Parviainen T., Helenius P., Poskiparta E. et al.* Cortical sequence of word perception in beginning readers // *J. Neurosci.* 2006. V. 26. № 22. P. 6052.
28. *Tarkiainen A., Helenius P., Hansen P.C. et al.* Dynamics of letter string perception in the human occipitotemporal cortex // *Brain.* 1999. V. 122. Pt. 11. P. 2119.
29. *Dehaene S., Pegado F., Braga L.W. et al.* How learning to read changes the cortical networks for vision and language // *Science.* 2010. V. 330. № 6609. P. 1359.
30. *Kronbichler M., Bergmann J., Hutzler F. et al.* Taxi vs. taksi: on orthographic word recognition in the left ventral occipitotemporal cortex // *J. Cogn. Neurosci.* 2007. V. 19. № 10. P. 1584.
31. *Bruno J.L., Zumberge A., Manis F.R. et al.* Sensitivity to orthographic familiarity in the occipito-temporal region // *Neuroimage.* 2008. V. 39. № 4. P. 1988.
32. *Dehaene S., Cohen L.* The unique role of the visual word form area in reading // *Trends Cogn. Sci.* 2011. V. 15. № 6. P. 254.
33. *Kronbichler M., Klackl J., Richlan F. et al.* On the functional neuroanatomy of visual word processing: effects of case and letter deviance // *J. Cogn. Neurosci.* 2009. V. 21. № 2. P. 222.
34. *Glezer L.S., Jiang X., Riesenhuber M.* Evidence for highly selective neuronal tuning to whole words in the “visual word form area” // *Neuron.* 2009. V. 62. № 2. P. 199.
35. *Schurz M., Sturm D., Richlan F. et al.* A dual-route perspective on brain activation in response to visual words: evidence for a length by lexicality interaction in the visual word form area (VWFA) // *Neuroimage.* 2010. V. 49. № 3. P. 2649.
36. *Coch D., Meade G.* N1 and P2 to words and wordlike stimuli in late elementary school children and adults // *Psychophysiology.* 2016. V. 53. № 2. P. 115.
37. *Maurer U., Brandeis D., McCandliss B.D.* Fast, visual specialization for reading in English revealed by the topography of the N170 ERP response // *Behav. Brain Funct.* 2005. V. 1. P. 13.
38. *Coch D., Mitra P.* Word and pseudoword superiority effects reflected in the ERP waveform // *Brain Res.* 2010. V. 1329. P. 159.
39. *Posner M.I., McCandliss B.* Brain circuitry during reading / *Converging methods for understanding reading and dyslexia* // Eds. Klein R.M., McMullen P. Cambridge, MA: MIT Press, 1999. P. 305.
40. *Pleisch G., Karipidis I.I., Brem A. et al.* Simultaneous EEG and fMRI reveals stronger sensitivity to orthographic strings in the left occipito-temporal cortex of typical versus poor beginning readers // *Dev. Cogn. Neurosci.* 2019. V. 40. P. 100717.
41. *Eberhard-Moscicka A.K., Jost L.B., Fehlbaum L.V. et al.* Temporal dynamics of early visual word processing—early versus late N1 sensitivity in children and adults // *Neuropsychologia.* 2016. V. 91. P. 509.
42. *Maurer U., Schulz E., Brem S. et al.* The development of print tuning in children with dyslexia: evidence from longitudinal ERP data supported by fMRI // *Neuroimage.* 2011. V. 57. № 3. P. 714.
43. *Maurer U., Brem S., Kranz F. et al.* Coarse neural tuning for print peaks when children learn to read // *Neuroimage.* 2006. V. 33. № 2. P. 749.
44. *Fraga-González G., Pleisch G., Di Pietro S.V. et al.* The rise and fall of rapid occipito-temporal sensitivity to letters: Transient specialization through elementary school // *Dev. Cogn. Neurosci.* 2021. V. 49. P. 100958.
45. *Wachinger C., Volkmer S., Bublath K. et al.* Does the late positive component reflect successful reading acquisition? A longitudinal ERP study // *Neuroimage Clin.* 2017. V. 13. № 17. P. 232.
46. *Fraga González G., Žarić G., Tijms J. et al.* Brain-potential analysis of visual word recognition in dyslexics and typically reading children // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 474.
47. *Maurer U., Brem S., Bucher K. et al.* Impaired tuning of a fast occipito-temporal response for print in dyslexic children learning to read // *Brain.* 2007. V. 130. Pt. 2. P. 3200.
48. *Brem S., Bucher K., Halder P. et al.* Evidence for developmental changes in the visual word processing network beyond adolescence // *Neuroimage.* 2006. V. 29. № 3. P. 822.
49. *Araújo S., Bramão I., Faisca L. et al.* Electrophysiological correlates of impaired reading in dyslexic pre-adolescent children // *Brain Cogn.* 2012. V. 79. № 2. P. 79.
50. *Sacchi E., Laszlo S.* An event-related potential study of the relationship between N170 lateralization and pho-

- nological awareness in developing readers // *Neuropsychologia*. 2016. V. 91. P. 415.
51. *Kemény F., Banfi C., Gangl M. et al.* Print-, sublexical and lexical processing in children with reading and/or spelling deficits: An ERP study // *Int. J. Psychophysiol.* 2018. V. 130. P. 53.
 52. *Stites M.C., Laszlo S.* Time will tell: A longitudinal investigation of brain-behavior relationships during reading development // *Psychophysiology*. 2017. V. 54. № 6. P. 798.
 53. *Brandeis D., Vitacco D., Steinhausen H.C.* Mapping brain electric micro-states in dyslexic children during reading // *Acta Paedopsychiatr.* 1994. V. 56. № 3. P. 239.
 54. *Milivojevic B.* Object Recognition Can Be Viewpoint Dependent or Invariant - It's Just a Matter of Time and Task // *Front. Comput. Neurosci.* 2012. V. 6. P. 27.
 55. *McCandliss B.D., Posner M.I., Givon T.* Brain plasticity in learning visual words // *Cogn. Psychol.* 1997. V. 33. № 1. P. 88.
 56. *Martin F.H., Kaine A., Kirby M.* Event-related potentials elicited during word recognition by adult good and poor phonological decoders // *Brain Lang.* 2006. V. 96. № 1. P. 1.
 57. *Holcomb P.J., Coffey S.A., Neville H.J.* Visual and auditory sentence processing: A developmental analysis using event-related brain potentials // *Dev. Neuropsychol.* 1992. V. 8. № 2–3. P. 203.
 58. *Bentin S., Mouchetant-Rostaing Y., Giard M.H. et al.* ERP manifestations of processing printed words at different psycholinguistic levels: time course and scalp distribution // *J. Cogn. Neurosci.* 1999. V. 11. № 3. P. 235.
 59. *Spirocelli C., Penolazzi B., Vio C., Angrilli A.* Cortical reorganization in dyslexic children after phonological training: evidence from early evoked potentials // *Brain*. 2010. V. 133. № 11. P. 3385.
 60. *Spirocelli C., Angrilli A.* Developmental aspects of automatic word processing: language lateralization of early ERP components in children, young adults and middle-aged subjects // *Biol. Psychol.* 2009. V. 80. № 1. P. 35.
 61. *Hasko S., Bruder J., Bartling J., Schulte-Körne G.* N300 indexes deficient integration of orthographic and phonological representations in children with dyslexia // *Neuropsychologia*. 2012. V. 50. № 5. P. 640.
 62. *Dehaene S.* Reading in the brain. London: Penguin Books, 2009. 400 p.
 63. *McCandliss B.D., Cohen L., Dehaene S.* The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus // *Trends Cogn. Sci.* 2003. V. 7. № 7. P. 293.
 64. *Vogel A.C., Petersen S.E., Schlaggar B.L.* The VWFA: it's not just for words anymore // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 88.
 65. *Maurer D., Barrera M.* Infants' perception of natural and distorted arrangements of a schematic face // *Child Dev.* 1981. V. 52. № 1. P. 196.
 66. *Nelson C.A.* The development and neural bases of face recognition // *Inf. Child Dev.* 2001. V. 10. № 1–2. P. 3.
 67. *Chyl K., Fraga-González G., Brem S., Jednoróg K.* Brain dynamics of (a)typical reading development—a review of longitudinal studies // *NPJ Sci. Learn.* 2021. V. 6. № 1. P. 4.
 68. *Gilmore J.H., Knickmeyer R.C., Gao W.* Imaging structural and functional brain development in early childhood // *Nat. Rev. Neurosci.* 2018. V. 19. № 3. P. 123.
 69. *Friederici A.D., Chomsky N., Berwick R.C. et al.* Language, mind and brain // *Nat. Hum. Behav.* 2017. V. 1. № 10. P. 713.

Psychophysiological Mechanisms of the Initial Stage of Learning to Read. Part II

E. I. Galperina^{a, b, *}, Jh. V. Nagornova^{a, b}, N. V. Shemyakina^{a, b}, A. N. Kornev^{a, **}

^aSt. Petersburg State Pediatric Medical University, Ministry of Health Care of the Russian Federation, St. Petersburg, Russia

^bSechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, St. Petersburg, Russia

*E-mail: galperina-e@yandex.ru

**E-mail: k1949@yandex.ru

A word is the minimal semantically meaningful unit of speech. At the initial stage of reading acquisition, word recognition occurs primarily at the sublexical level. The study of the mechanisms of reading acquisition is an important multidisciplinary fundamental scientific problem. This review is a continuation of the first part, which considered the psychophysiological mechanisms of sound-letter association and the establishment of sensitivity to fonts at the initial stage of mastering the skill of reading. This paper considers the studies of mechanisms of the whole words perception in comparison with pseudo-words and chains of pseudo-fonts perception. The stages of a skill development, the nature of establishing sound-letter relations, formation of lower level mechanisms in children: recoding and decoding, and physiological correlates of selectivity and sensitivity to fonts and printed words are described. This review includes psychophysiological studies of the structural and functional support of reading: SSP-, fMRI- and MEG-studies with the participation of children 4–10 years old.

Keywords: reading, acquisition, psycholinguistics, neurophysiology, psycholinguistics, ERP, fMRI recoding, decoding, children, elementary stage, words, pseudo words, pseudo fonts.