

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ НАЧАЛЬНОГО ЭТАПА ОВЛАДЕНИЯ ЧТЕНИЕМ. ЧАСТЬ I

© 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.

Изучение механизмов чтения является актуальной мультидисциплинарной фундаментальной научной проблемой. На русском языке в последние годы опубликованы несколько обзоров по психофизиологии чтения, однако современные научные данные о механизмах овладения навыком чтения остаются недостаточно освещенными, особенно в отношении начальных его этапов. В данном обзоре представлен синтез данных, накопленных в когнитивной психологии и психофизиологии о механизмах начального этапа освоения навыка чтения. Предпринята попытка концептуального анализа существующих экспериментальных данных и теоретических подходов. Обсуждаются существующие теории формирования церебральных подсистем обработки буквенных и небуквенных символов. Рассматриваются этапы формирования навыка, начиная с дописьменного и формирования метаязыковых предпосылок, обсуждаются природа и механизмы установления звукобуквенных ассоциаций, мозговые механизмы избирательности и инвариантности распознавания букв в зависимости от опыта обучения. В данный обзор включены преимущественно методически единые образные психофизиологические исследования структурно-функционального обеспечения чтения: с помощью связанных с событиями потенциалов, функциональной магнитно-резонансной томографии и магнитоэнцефалографии – ССП-, фМРТ- и МЭГ-исследования с участием детей 4–10 лет.

Ключевые слова: чтение, формирование, психология, нейрофизиология, психолингвистика, нейровизуализация, рекодирование, декодирование, дети.

DOI: 10.31857/S0131164622020072

Появление письменности в истории человечества сыграло чрезвычайно важную роль, создав филогенетически новый когнитивный инструмент, расширивший у людей познавательные возможности и создавший новые формы коммуникации, повлиявшие на социальную и культурную эволюцию человечества. Использование письменности поставило перед человеческим мозгом новые задачи, которые эволюционно не были предусмотрены в его структурно-функциональной организации. Согласно ресайклинг-гипотезе *S. Dehaene et al.*, опыт взаимодействия с печатным текстом настраивает у человека определенные структуры мозга на обработку текста и формирует новые нейросети, приспособленные для сканирования и распознавания рядов букв (или иероглифов), пространственно организо-

ванных в строки/столбцы, где важен порядок их расположения – слева направо или наоборот, справа налево [1, 2]. Далее происходит рекодирование их в фонологические (или лексические) структуры с последующим соотнесением с ментальным лексиконом, концептами и интеграцией в макропропозиции и смысловую модель-образ текста [3–5]. За первые 3–4 года обучения дети осваивают базовые технические навыки чтения и понимания относительно простых текстов, и еще 4–5 лет уходит на освоение стратегий смыслового анализа более сложных печатных текстов различных жанров и навыкам критического чтения.

Более полувека мозговые механизмы формирования навыков чтения по большей части выводились из данных, полученных в исследованиях взрослых людей с очаговыми поражениями го-

ловного мозга. Во второй половине XX в. благодаря появлению технических средств нейровизуализации (позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), магнитно-резонансная томография (МРТ) и функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), магнитоэнцефалография (МЭГ) и др.) появилась возможность изучать их непосредственно у детей разного возраста.

Учиться читать — это усваивать, как в системе письменности кодируется некий язык [6], и в разных системах письменности это происходит различно [7, 8]. В иероглифической письменности графические знаки (иероглифы) обозначают целое слово или морфему (как например, в китайском языке), а в алфавитической письменности буквы соотносятся со звуками (точнее, с фонемами), составляющими слово. Соответственно, различаются и когнитивные требования, которые усвоение грамоты предъявляет к ребенку [7]. Имеет значение и метод обучения: глобальный (зрительное запоминание целых слов) или аналитический (реконструкция звуковой структуры слова по серии букв) [9, 10]. В настоящем обзоре представлены данные, относящиеся преимущественно к алфавитическим системам письменности.

Анализ существующих публикаций свидетельствует о значительном преобладании англоязычных исследований. Соответственно, низкая транспарентность (нерегулярное соответствие написания и произношения) английской письменности повлияла на представления о механизмах и модели усвоения чтения и письма. Психологические и церебральные механизмы усвоения письменности в транспарентных языках (например, итальянском и испанском) изучены меньше. Это относится и к русской письменности, которая применительно к чтению (в отличие от письма) тоже может считаться достаточно транспарентной [11, 12].

Существующие научные сведения о мозговом обеспечении чтения были получены в рамках нескольких экспериментальных подходов: а) на основе модели повреждения — нейропсихологические исследования больных с очаговыми поражениями головного мозга, б) секционные гистологические исследования мозга *post mortem*, в) исследования лиц, страдающих алексией или дислексией, г) исследования с использованием ЭЭГ-методов и нейровизуализации: ПЭТ, МРТ, фМРТ и МЭГ.

Благодаря нейропсихологическим исследованиям приобретенных нарушений чтения у больных с очаговыми поражениями головного мозга стало очевидно, что церебральная организация чтения имеет распределенный характер и включает такие отделы коры, как височно-затылочная, верхне- и нижнетеменная, верхневисочная, височно-теменная, а также нижнелобные отделы

доминантного полушария (*Dejerine, Geschwind, Caramazza*, цит. по [13]) [14–18]. Позже, нейробиологические исследования методами нейровизуализации (ПЭТ и фМРТ) воспроизвели значительную часть данных, полученных на основе модели повреждения, а также добавили много новых сведений. Выяснилось, что зрительное предъявление слов увеличивает мозговой кровоток (по параметрам *BOLD*-сигнала) в следующих областях мозга: экстрастриарной коре (вторичных отделах зрительного анализатора, полях Бродмана 18 и 19) левого полушария, в задней левой верхней и средней височной извилине, левой ангулярной извилине и классической “зоне зрительных образов слов” (*visual word form area — VWFA*), левой вентральной теменно-затылочной коре [19–22]. Была выдвинута гипотеза о специфической функции *VWFA*, являющейся хранилищем зрительных образов слов [1, 23]. В исследованиях *K.R. Pugh et al.* [24] была предложена модель церебрального обеспечения чтения слов, содержащая две подсистемы или два потока: 1) вентральный поток (*ventral stream*), включающий височно-затылочную кору, обеспечивающий быстрое распознавание слов путем прямого соотношения орфографического образа слова с его значением; 2) дорзальный поток (*dorsal stream*), включающий теменно-височную кору, осуществляющий более медленное, аналитическое распознавание слов с последующей конверсией полученного результата в фонологическое слово, которое соотносится с семантикой [25].

Известно, что чтение — это сложно организованный, комплексный навык, включающий ряд навыков нижнего (распознавание букв и слов) и высшего уровня (интеграция значений слов и словосочетаний с учетом контекста, формирование индивидуального образа текста во взаимодействии с индивидуальной базой знаний читателя) [14, 26–31]. Механизмы чтения мультимодальны: в этом процессе участвуют зрительный гнозис, внимание, память, артикуляционный и окулomotorный праксис, слухоречевой гнозис [1, 11, 14, 27, 32]. С некоторой долей условности существующие исследования церебральных механизмов чтения можно отнести к одной из двух категорий: а) исследования механизмов нижнего уровня (чтение слов вне контекста, рекодирования и декодирования) и верхнего уровня (чтение предложений, текстов и их осмысление). Тема настоящего обзора — формирование у детей механизмов нижнего уровня: рекодирования и декодирования.

Рекодирование (*recoding*) — стратегия распознавания слов/неслов при чтении, когда каждая буква соотносится с соответствующим звуком речи, и конечным продуктом является фонетическое слово. Декодирование (*decoding*) — это стратегия распознавания и соотношения письменного

слова с его значением, т.е. процесс лексического доступа (*lexical access*): соотнесение фонологического/орфографического слова с релевантной единицей персонального ментального лексикона [28, 33].

Для снижения разнородности данных в настоящем обзоре при отборе публикаций учитывались некоторые методические особенности дизайна эксперимента, влияющие на интерпретацию результатов: вид функциональной нагрузки, тип задачи, выполняемой испытуемыми, использованные контрасты [34–36]. В данный обзор включены преимущественно методически единые психофизиологические исследования с помощью связанных с событиями потенциалов – ССП, фМРТ- и МЭГ-эксперименты.

Этапы овладения грамотой и чтением

Процесс овладения чтением занимает достаточно продолжительный отрезок времени, длиною в несколько лет. До начала регулярного обучения существует период, который принято называть дописьменным (*pre-literacy*), а в российской системе образования его называют добукварным. Содержанием дописьменного периода является организованное формирование комплекса необходимых языковых, метаязыковых и когнитивных предпосылок освоения грамоты. В англо-американской традиции это направление представлено в рамках двух концепций: 1) более ранней концепции готовности к чтению (*reading readiness*) [37] и 2) сменившей ее модели “возникающей грамотности” (*emergent literacy*) [38]. Основное содержание этих моделей совпадает, но вторая отличается от первой принятием идеи спонтанного, имплицитного познания ребенком письменности, градуально постепенно еще до начала организованного эксплицитного обучения [38–42].

Первые 3–4 года школьного обучения уходят преимущественно на овладение навыком реконструкции устного текста на основе письменного (т.е., так называемой “техникой чтения”) [28, 43, 44]. Не менее 5–7 лет требуется для формирования навыков и стратегий извлечения информации из письменных текстов и синтеза смыслового целого, т.е. того, что принято называть функциональной грамотностью [30, 45–47] (подробнее см. [27, 28]).

В нейробиологических исследованиях учитывается не только возраст испытуемых, но и степень сформированности навыков, продолжительность обучения чтению. Среди многообразия классификаций, в которых выделялись от 2 до 5 этапов или фаз усвоения навыка чтения [48, 49], две используются чаще: классификация Т.Г. Егорова [48] (стадии побуквенного, слогового чтения

и чтение целым словом) и U. Frith [50] (3 стадии: логографическая, алфавитическая и орфографическая). Для логографической стадии характерно глобальное запоминание некоторых слов и их значений в виде целостного образа [50]. На алфавитическом этапе дети декодируют графическое слово на основе дискретных, звукобуквенных соответствий, т.е. полного списка графем (и аллографов¹) и их фонологических соответствий (побуквенное чтение в типологии Т.Г. Егорова [48–50]). Этап орфографического чтения (синтетическое чтение по Т.Г. Егорову) характеризуется переходом от побуквенной стратегии декодирования к опознанию сразу группы букв. Был предложен и иной подход к анализу этапов усвоения технических навыков чтения, опирающийся на теорию оперативных единиц чтения (ОпЕЧ), где этап – это доминирующая у ребенка ОпЕЧ: отдельные буквы → слоги типа СГ/ГС (“С” – “согласный”, “Г” – “гласный”) → слоги типа ССГ → слоги типа СГС → слоги типа ССГС [30, 31, 51].

Нельзя не согласиться с утверждением А.Р. Лурия: “Едва ли не наиболее существенная для процесса чтения черта, /.../ состоит в том, что психофизиологический состав акта чтения коренным образом изменяется по мере его развития и автоматизации” [14]. По этой причине в настоящий обзор включены преимущественно публикации с высокой степенью возрастной однородности (от 4 до 10 лет).

Одна из самых ранних теорий формирования готовности к овладению грамотой принадлежит Л.С. Выготскому, который экспериментально обосновал идею метаязыкового развития, т.е. осознания речи и языка, что предшествует освоению грамоты, а сам термин был введен в обиход значительно позже [43, 52]. В любой системе письменности графические знаки (например, буквы или иероглифы) обозначают определенные сегменты устной речи (слово, слог или звук/фонему). Большинство детей 4–5 лет, владея навыками оперирования рабочими элементами речи, тем не менее, не осознают саму речь и ее структурные единицы [52, 53]. Было замечено, что необходимым условием овладения грамотой является осознание детьми речи, как самостоятельного явления, ее сегментарной структуры [43, 48, 54]. Примерно до 4.5 лет дети, владея речью, навыками продуцирования слов и фраз из слогов и фонем, адекватно соотнося слова с их семантическим референтом, саму речь, ее языковые единицы еще не осознают. Для того чтобы усвоить систему ассоциаций звуков и букв детям необходимо осознать саму речь, ее сегментную структуру. В связи с требованиями методик обучения, используемых в алфавитических видах письмен-

¹ Аллографы – варианты написания одной и той же графемы (письменное, печатное, строчное, прописное и др.).

ности, прежде чем знакомиться с алфавитом ребенок должен научиться осознанно представлять, с какими сегментами речи соотносятся буквы, т.е. осознанно представлять звуковую структуру слов и уметь делить слова на слоги и звуки [31]. Этот род навыков получил название метафонологических, или навыков фонологического осознания (*phonological awareness*) [54–57].

Нейробиологические основания металингвистических навыков

В темпах и качестве формирования метафонологических навыков у детей существуют определенные индивидуальные различия, которые зависят от состояния как речевых навыков, так и неспецифических метакогнитивных и управляющих функций (*executive functions*) [58–62]. Характеристики дошкольного периода развития речи детей 3–7 лет с высокой значимостью коррелируют с когнитивным, эмоциональным и поведенческими компонентами школьной адаптации [63].

Их формирование отражается на определенных психофизиологических характеристиках. В ЭЭГ-исследовании *E.S. Norton et al.* [64] у детей-дошкольников была показана положительная корреляция сформированности метафонологических навыков (*phonological awareness*) и амплитуды позднего компонента вызванного потенциала *MMN*. В фМРТ-исследовании *N.M. Raschle et al.* [65] приняли участие дети 5.5 лет еще не владевшие чтением, часть из которых имела по генеалогическим данным риск дислексии, а другая часть — нет. Успешность выполнения заданий выделения звука в слове (контраст — восприятие голоса) у детей без риска дислексии положительно влияла на интенсивность *BOLD*-сигнала в фузиформной, нижней и средней лобной, прецентральной извилинах слева, клиновидной/средней затылочной извилинах билатерально и мозжечке справа. У детей группы риска уровень *BOLD*-сигнала в затылочно-височной коре билатерально и височно-теменной коре левого полушария был достоверно ниже. Было выдвинуто предположение, что уровень функциональной активности затылочно-височных и теменно-височных зон левого полушария является индикатором метафонологической компетентности. В другом фМРТ-исследовании изучались церебральные механизмы формирования метафонологических навыков на примере подбора устных рифмующихся слов детьми-дошкольниками 6–7 лет и учащимися 1 класса (7 лет) с высоким/низким риском дислексии (по генеалогическим данным) [66] (табл. 1). Экспериментальная метаязыковая задача вызвала у дошкольников с низким риском достоверное увеличение активности, по сравнению с задачей на различение голоса во многих областях мозга: средней лобной и прецентральной извилинах

билатерально и левой верхней лобной извилине, теменных и височных областях (средняя височная извилина билатерально и правая верхняя височная извилина), фузиформной и лингвальной извилинах билатерально и левой лимбической доле. У дошкольников с высоким риском дислексии достоверного изменения активности выявлено не было.

В более детализированном исследовании *I. Kovelman et al.* [67] учащимся 1–5 классов и дошкольникам показывались пары последовательно аудиально предъявленных слов. Требовалось определить: рифмуются ли два слова (задача 1) или они идентичны (задача 2). Как у школьников, так и у дошкольников церебральная активность, достоверно различавшая эти два задания (рифмовка > идентичности), наблюдалась в левой дорзальной префронтальной коре. Это согласуется с психологическими свидетельствами роли управляющих функций в формировании метаязыковых навыков [68]. Иными словами, церебральная основа формирования метаязыковых навыков имеет распределенный характер, включая области, связанные с речью, область зрительных образов слов (*VWEA*) и структуры, участвующие в управляющих функциях (*executive function*).

Механизм формирования звукобуквенных ассоциаций

Как было отмечено ранее, начальным этапом освоения грамоты у детей является знакомство с алфавитом и формирование звукобуквенных ассоциаций, а также их последующая автоматизация [30, 31]. Среди детей отмечается значительная индивидуальная вариативность в темпах и качестве этих начальных навыков. Предполагается, что одной из причин вариативности являются особенности формирования психофизиологических механизмов, лежащих в основе формирования навыка. В ряде психофизиологических исследований начального этапа овладения чтением были получены свидетельства появления повышенной чувствительности головного мозга к восприятию букв алфавита, с которым знаком ребенок [1, 69]. В фМРТ-исследованиях детей первого-второго годов обучения было показано, что ключевой переменной является появление сенситивности или т.н. грубой настройки (*coarse tuning*) и селективности или т.н. тонкой настройки (*fine tuning*) [70]. Ряд авторов полагают, что сенситивность выражается в разнице интенсивности *BOLD*-сигнала активности мозга на предъявление букв знакомого алфавита по сравнению с небуквенными стимулами (например, лица или дома), а селективность — это разница активности на серию букв знакомого алфавита (*letter string*) и псевдошрифта [71, 72]. В исследовании *K.H. James et al.* [73] показано, что участки левой височно-за-

Таблица 1. Сопоставление психофизиологических исследований навыков чтения на ранних этапах

Источник	Возрастной состав испытуемых	Виды стимулов	Задание	Использованные контрасты	Обнаруженные эффекты	Вид исследования
<i>James et al.</i> , 2010 [74]	Дошкольники, $n = 12$ от 4.3–5.4 лет	Буквы, символы псевдошрифтов, простые фигуры	Пассивный просмотр, найти букву	Фигуры–буквы. Буквы-псевдошрифты	Активация в фузиформной извилине была выше на простые фигуры, чем на буквы, и на буквы больше, чем на псевдошрифты	фМРТ
<i>Brem et al.</i> , 2010 [90]	Дошкольники, средний возраст 6.4 ± 0.08 лет, в фМРТ $n = 16$; в ССП $n = 32$	Слова, цепочки псевдошрифтов, неразборчивая речь	Ребенок оценивал: 1. сопоставление зрительно и на слух предъявленных слов, 2. сопоставление псевдошрифтов и неразборчивой речи. модальность	Слова-псевдошрифты до тренировки и после тренировки	Процессы с латентностью до 250 мс в задних затылочно-височных зонах на ранних этапах овладения чтением. Амплитуда N1, а также <i>BOLD</i> -сигнал в левой задней фузиформной извилине, правой нижней-височной извилине выше на слова, чем на псевдошрифты после тренировки	ССП
<i>Yamada et al.</i> , 2011 [75]	Дети с нормальным развитием (5.7 ± 0.3 лет)	1. Буквы. 2. Буквоподобные стимулы (ложный шрифт)	Нажимать на кнопку, при совпадении двух последовательных стимулов	1. “Буквы” vs “Буквоподобные стимулы”	При восприятии букв по сравнению с ложным шрифтом (эффект селективности) активируются височные области билатерально. После 3 мес. обучения наблюдалась леволатерализованная активация в височно-теменной области	фМРТ
<i>Centanni et al.</i> , 2018 [71]	Дети 5–6 лет, еще не имеющие систематического обучения чтению: 5.5 ± 0.3 лет	– Строчные буквы английского алфавита (10 повторяющихся букв); – ложный шрифт (стегенированный из тех же букв); – лица	Нажимать на кнопку, при совпадении двух последовательных стимулов	“Буквы” > “Лица”; “Лица” > “Буквы”; “Буквы” > “Ложный шрифт”	Большая специфичность к буквам (буквы > ложный шрифт), но не чувствительность (буквы > лица), в левой веретенообразной извилине положительно коррелировала с показателями чтения слов. Большой размер коры, чувствительной к восприятию букв коррелировал с меньшим размером коры, чувствительной к восприятию лиц (лица > буквы)	фМРТ

Таблица 1. Продолжение

Источник	Возрастной состав испытуемых	Виды стимулов	Задание	Используемые контрасты	Обнаруженные эффекты	Вид исследования
<i>Centanni et al.</i> , 2019 [72]	1. Дети — норма, 5.6 ± 0.32 лет. 2. Группы риска с последующим нормальным развитием, 5.5 ± 0.26 лет и нарушениями навыков чтения, 5.7 ± 0.33 лет	— Строчные буквы английского алфавита (10 букв), — ложный шрифт (стенерированный из тех же букв), — лица, — состояние фиксации взгляда	Нажимать на кнопку, если стимул последовательно повторяется дважды	“Буквы” > “Лица”; “Буквы” — “Фиксация” vs “Ложный шрифт” — “Фиксация”	У детей из группы риска, у которых впоследствии идентифицировалось нарушение развития навыков чтения, по сравнению с контрольной группой нормы, наблюдается пониженная активация области зрительного образа слов левого полушария при восприятии букв и ложных шрифтов. У детей из группы риска с последующим нормальным развитием навыков чтения подобно снижению активации области зрительного образа слов, по сравнению с контрольной группой нормы, не наблюдается	фМРТ
<i>Wang et al.</i> , 2020 [78]	Дети с нормальным развитием: T1: 6.9 ± 0.4 лет, T2: 8.4 ± 0.3 лет	Короткие произносимые неслова визуально и аудиально: 1. контрэнтин. условия, 2. неконтрэнтин. условия	Нажимать на кнопку, если появится изображение черепахи и звук колокольчика	— “Контрэнтинные” vs “отдых”, — “Неконтрэнтинные” vs “отдых”; — “Контрэнтинные” vs “Неконтрэнтинные”	В возрасте 6 лет (T1) эффекта контрэнтинности зрительного и звукового стимула не выявлено. В возрасте 8 лет (T2) неконтрэнтинные стимулы вызывают большую активацию билатерально в нижней височной и в верхней лобной извилинах	фМРТ
<i>Froyen et al.</i> , 2009 [93]	Ученики 2 и 4 класса	Звуки и буквы	Опознание совпадения или несовпадения звука и буквы		У учащихся 2 и 4 классов полученные данные свидетельствовали, что у учащихся 2 класса эти связи еще не автоматизированы в отличие от испытуемых 4 класса	ССП ММН

Таблица 1. Продолжение

Источник	Возрастной состав испытуемых	Виды стимулов	Задание	Использованные контрасты	Обнаруженные эффекты	Вид исследования
<i>Chiarenza et al.</i> , 2013 [86]	65 детей нормы (6–13 лет) ($mean \pm SD$: 10.3 $\pm$ 1.79 лет) (53 мальчика, 12 девочек)	21 строчная и заглавная буква итальянского алфавита	4 теста: 1) просмотр предъявляемых букв (<i>Externally-paced letter presentation (EPLP)</i>); 2) чтение вслух предъявляемых букв (<i>Externally-paced letter reading (EPLR)</i>) 3) просмотр букв в свободном режиме (<i>Self-paced letter presentation (SPLP)</i>). 4) чтение вслух букв в свободном режиме (<i>Self-paced letter reading (SPLR)</i>)	<i>EPLR – SPLR</i>	Фронтальные, височные, центральные, затылочные области при чтении по сравнению с пассивным просмотром: амплитуда P1, P2 выше во фронтальных и теменных областях, N4 – в височных и затылочных областях, P600 выше во всех областях	ССП
<i>Blackburne et al.</i> , 2014 [95]	1. Дети 5–12 лет, средний возраст 9.5 лет. 2. Взрослые 18–26 лет, средний возраст 22.3 года	Буквы, расположенные стандартно и зеркально	Нужно было реагировать на цвет фона	– Слова (3–9 букв), – лица, – предметы, – бессмысленные каракули, – буквы, – перевернутые по вертикальной оси буквы	P1 – амплитуда выше для перевернутых букв по сравнению с обычными, у взрослых эффект выше. Пик N170 у взрослых достоверно меньшей латентности как для обычных, так и для перевернутых букв. У взрослых выявлены различия латентности пика N170: для перевернутых букв латентность достоверно больше, чем для обычных. У детей разницы не обнаружено	ССП, фМРТ
<i>Bakos et al.</i> , 2017 [91]	Дети 9 лет с дислексией ($n = 36$) и норма ($n = 37$)	Буквы	Нужно было определить, одинаково ли выглядят 2 стимула	Пары букв – совпадающие и несовпадающие зрительно и при произношении	N1 имел меньшую амплитуду в ситуации конфликта фонологической и зрительной информации в группе нормально читающих, конфликта у дислексиков не было	ССП

Таблица 1. Окончание

Источник	Возрастной состав испытуемых	Виды стимулов	Задание	Использованные контрасты	Обнаруженные эффекты	Вид исследования
<i>Karipidis et al.</i> , 2017 [92]	Дети 6–7 лет	Символы псевдошрифтов	Экспериментальное обучение искусственному алфавиту, соотнесение псевдошрифтов со знаковыми фонемами		N400, P600 в левом полушарии увеличивали свою амплитуду по мере приобретения нового навыка, что отражает формирование аудиовизуальной интеграции	ССП, фМРТ
<i>Lochy et al.</i> , 2016 [77]	Дошкольники 5 лет ($n = 40$)	Цепочки букв и цепочки псевдошрифтов, слова и псевдослова	Быстрая стимуляция 6 стимулов в минуту с разной частотой	Селективность на буквы: псевдошрифты-слова, псевдошрифты-псевдослова. Лексический доступ: псевдослова-слова. Зрительная схожесть — псевдошрифты-знаки псевдослова в соотношении 1/5	Селективность к буквам в левой затылочно-височной области	<i>FPVS-EEG frequency-tagging EEG</i>
<i>van de Walle de Ghelcke et al.</i> , 2021 [76]	39 детей 1 года обучения (6.45 ± 0.33)	Цепочки букв и цепочки псевдошрифтов, слова и псевдослова	Быстрая стимуляция 6 стимулов в минуту с разной частотой. 4 теста в парадигме <i>odd-ball</i> : базовые и девиантные стимулы	Селективность на буквы: псевдошрифты-слова, псевдошрифты-псевдослова. Лексический доступ: псевдослова-слова. Зрительная схожесть — псевдошрифты-знаки	Селективность к буквам в левой затылочно-височной области, на индивидуальном уровне в 62%. Слова зрительные не отличаются от псевдослов. В течение года специфический ответ на буквы показал увеличение амплитуды, более сложные гармоника и сместились кпереди	<i>FPVS-EEG frequency-tagging EEG</i>
<i>Fraga-Gonzalez et al.</i> , 2021 [94]	65 детей дошкольников с семейным риском дислексии тестировали в лонгитуде 5 раз до 5 класса	Буквы, звуки, псевдослова, цифры, псевдошрифты	Нажимать на кнопку при появлении заранее заданного символа	Буквы-псевдошрифты	Амплитуда N1 в затылочно-височной коре по мере развития навыка имеет перевернутую U-образную форму в ситуации чувствительности к буквам	ССП

Примечание: ЛП — левое полушарие, ПП — правое полушарие.

тылочной зоны, активирующиеся на цепочки букв, расположены рядом с областью зрительных образов слов (*VWFA*), а активность при восприятии отдельных букв расположена существенно кпереди от *VWFA*.

Актуальным является вопрос: насколько рано возникает специализация мозга на обработку букв и слов, и какие для этого необходимы условия. В фМРТ-исследовании [74] у детей в возрасте 4–5 лет регистрировали *BOLD*-сигналы при демонстрации букв, псевдошрифта и картинок (пассивное восприятие). Мозговая активность на буквы в передней части левой фузиформной извилины была выше, чем на псевдошрифт и картинки, в отличие от правой фузиформной извилины, где различий не было. После курса тренировочных занятий и повторном фМРТ-исследовании активность в левой фузиформной коре значимо возросла. Авторы предполагают, что уже до 4 лет дети имеют опыт знакомства с буквами, и это способствует преднастройке мозга.

В лонгитюдном фМРТ-исследовании *Y. Yamada et al.* [75] у детей 5–6 лет после курса начального обучения чтению было обнаружено повышение селективности реакции мозга (изменение реакции мозга на буквы по сравнению с псевдошрифтом), что выразилось в билатеральной активации (буквы > псевдошрифта) в теменно-височной зоне слева. Такие же результаты были получены в похожем по дизайну лонгитюдном эксперименте группы *A. Lochy* [76, 77]: наличие селективности на буквы (буквы > псевдошрифта) в левой височно-затылочной зоне, что наблюдалось у 62% испытуемых и усилилось через 1 год обучения в школе, и отсутствие селективности на слова (слово – квазислово), как в первом, так и во втором классах. Уровень селективности у детей коррелировал с навыком чтения.

В исследовании *T.M. Centanni et al.* [71] у детей-дошкольников 5–6 лет, имевших минимальные знания алфавита, признаки сенситивности (буквы > изображений лиц) и селективности (буквы > псевдошрифта) реакции мозга были обнаружены в области левой фузиформной извилины. Статистически значимые корреляции показателей активности мозга и навыков чтения были выявлены для эффектов селективности, но не сенситивности. Продолжая эту линию исследований [72], те же авторы в лонгитуде выяснили, что пониженная селективность реакции в области левой фузиформной извилины в начале обучения является прогностическим признаком отставания в чтении во 2 классе. Обобщая, исследователи отмечают, что сенситивность на буквы у детей формируется очень рано и мало отличается детей 7–14 лет от взрослых, а селективность, наоборот, продолжает формирование до подросткового возраста.

Формирование звукобуквенных связей исследовалось и в парадигме конгруэнтности/неконгруэнтности устных и письменных стимулов. В лонгитюдном фМРТ-исследовании *F. Wang et al.* [78] учащимся в первом и во втором классах предъявлялись неслова и их фонетические эквиваленты (конгруэнтные пары) или неконгруэнтные фонетические стимулы (неконгруэнтные пары). В первом классе не было обнаружено различий в параметрах *BOLD*-сигнала, а во втором – был выявлен достоверный эффект неконгруэнтности: восприятие неконгруэнтной пары вызывало больший ответ в нижней височной и верхней лобной извилинах билатерально по сравнению с конгруэнтной парой. Кроме того, одновременно с улучшением качества чтения неслов в задней части левой верхней височной извилины ответ на конгруэнтные пары становился большим, чем на неконгруэнтные пары.

Проблема церебральных механизмов усвоения алфавита исследовалась и с помощью ЭЭГ-метода ССП. Процесс распознавания букв и слов, первых, связан с использованием информации на нескольких уровнях обработки (высшем и низшем), во-вторых, разворачивается довольно быстро. Длительность фиксации взора на слове варьирует в пределах 200–300 мс [79]. Поэтому первоначальная фаза зрительного распознавания слова происходит в первые 200 мс [80]. Принятие решения о семантической составляющей слова происходит позже, на основе следов в оперативной памяти, как и перевод в устное высказывание при чтении вслух [81]. Следовательно, релевантным для изучения этого процесса методом является метод ССП/*ERP*, имеющий высокую временную разрешающую способность и отражающий изменения постсинаптических потенциалов коры головного мозга [82], происходящие на временных отрезках миллисекундного диапазона [83].

В исследованиях с использованием метода ССП/*ERP* у детей были описаны изменения нейронной активности определенных структур мозга, возникающие в процессе освоения детьми начальных элементарных навыков чтения. Чувствительными показателями таких изменений, появляющимися в ответ на предъявление букв, оказались ранние сенсорные компоненты, такие как N1 или N170, P1, N2, которые регистрируются и при восприятии других знакомых изображений (например, лиц, автомобилей) [84–86]. Для исследования эффектов сенситивности к буквенным структурам используются серии букв (*letter strings*), состоящие из согласных, или неслова, т.е. словоподобные буквенные структуры. В качестве контрастов чаще используются картинки, цифры, небуквенные символы или иероглифы [87–90]. Следует отметить, что среди таких исследований мало тех, где в качестве стимулов используют отдельные буквы [91–93]. Чаще для изучения

ранних этапов усвоения букв используют такие стимулы, как ряды букв, произносимые или непроизносимые (например, цепочки согласных), сравнивая их с цепочками псевдошрифта. Исследования показали, что у детей, начинающих осваивать грамоту, быстро появляется эффект чувствительности к буквам, но в более позднем временном интервале, чем у взрослых. Так, в исследовании *U. Maurer et al.* [87], только хорошо читавшие дошкольники демонстрировали сопоставимый со взрослыми эффект чувствительности на серии букв по сравнению с псевдошрифтом, однако компонент N1 возникал у них с более поздней, чем у взрослых, латентностью (300 мс). Менее чем через 2 года учебы у этих детей усилился эффект чувствительности на печатный шрифт по сравнению с псевдошрифтом [88]. За несколько лет та же группа исследователей провела 5 ЭЭГ-экспериментов с одной и той же группой из 35 детей: их обследовали в дошкольном возрасте, дважды в 1 классе, во 2 и в 5 классах. В качестве стимулов использовали отдельные буквы, цифры и псевдошрифты. Признаки чувствительности для букв (амплитуда на буквы > псевдошрифт) проявились в вентральной части височно-затылочной зоны только во втором и третьем экспериментах (в 1 классе), т.е. постепенно возрастали, а затем снижались к 5 классу. Левостороннее доминирование наблюдалось только во втором эксперименте, где у большего числа испытуемых амплитуда ССП была выше в левом полушарии [94]. Выраженность чувствительности коррелировала с прочностью звукобуквенных ассоциаций, но наиболее стабильной эта связь была в правом полушарии.

В эксперименте с чтением букв у детей 6–13 лет было установлено, что амплитуда компонентов P1, P2b, N3, N4, P600 становится выше при чтении букв вслух по сравнению с их пассивным просмотром [86].

Важным вопросом является инвариантность распознавания букв. В ССП-исследовании *L.K. Blackburne et al.* [95] детям и взрослым предъявляли стимулы-буквы, расположенные стандартно и зеркально. У взрослых зеркально расположенные буквы вызывали потенциалы P1 и N170 с достоверно большей амплитудой, чем стандартно расположенные буквы, а у детей различий обнаружено не было.

Как предполагают исследователи [1] формирование восприятия букв, как знаков в процессе усвоения грамоты имеет два уровня распознавания: низший и высший. На низшем уровне буквы распознаются так же, как изображения и праволевая ориентация не имеет принципиального значения для опознания. На высшем, знаковом уровне, наоборот, знак опознается только в типовом его расположении относительно оси право-лево.

Используя другую парадигму — экспериментальное обучение искусственному алфавиту детей 6–7 лет, исследователи получили результаты, свидетельствовавшие, что приобретение нового навыка сопровождается увеличением амплитуды волновых компонентов ССП с латентностью 400 и 600 мс в левом полушарии [92], что отражает, по мнению авторов, формирование аудиовизуальной интеграции.

Важным компонентом усвоения звукобуквенных ассоциаций является их автоматизация. В исследовании *S. Bakos et al.* [91] сопоставляли степень автоматизированности звукобуквенных связей с помощью парадигмы конфликта между зрительным образом буквы (например, А-а) и ее фонематической идентичностью. Предъявление конфликтных пар увеличивало время реакции сравнения, снижало амплитуду компонента N1 и увеличивало амплитуду позитивного компонента (*slow potentials — cSP*) в отличие от предъявления конгруэнтных пар. У детей с дислексией ССП на эти два типа предъявлений не различались, т.е. звукобуквенные связи не были автоматизированы, как полагают авторы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в данном обзоре материалы позволяют сформировать пока еще весьма неполную картину того, каковы церебральные механизмы, позволяющие детям сделать первые шаги в освоении весьма сложного комплекса навыков, лежащих в основе декодирования печатных слов. Важным этапом, влияющим на успешность освоения чтения, является формирование метаязыковых навыков, которые связаны с активностью комплекса узкоспециальных для речи и чтения структур (*domain-specific*) и структур, выполняющих многофункциональные стратегические задачи (*domain-general*), относящихся к управляющим функциям (*executive functions*). Формирование начальных навыков чтения: звукобуквенных связей и навыков декодирования слов и неслов, сопровождается увеличением чувствительности височно-затылочных отделов коры к словам и словоподобным буквенным структурам. Это согласуется с экспериментальными данными, подтверждающими, что на первом-втором годах обучения у многих детей ведущей ОпЕЧ остается буква, а автоматизированное чтение слогов типа СГ/ГС и ГСГ формируется к концу 2 класса и в начале третьего классов [51].

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. *Dehaene S.* Reading in the brain: The New Science of How We Read. London: Penguin Books, 2009. 400 p.
2. *Dehaene S., Cohen L., Morais J., Kolinsky R.* Illiterate to literate: behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition // *Nat. Rev. Neurosci.* 2015. V. 16. № 4. P. 234.
3. *Perfetti C., Helder A.* Incremental Comprehension Examined in Event-related Potentials: Word-to-Text Integration and Structure Building // *Discourse Processes.* 2021. V. 58. № 1. P. 2.
4. *van Moort M.L., Jolles D.D., Koornneef A., van den Broek P.* What you read versus what you know: Neural correlates of accessing context information and background knowledge in constructing a mental representation during reading // *J. Exp. Psychol. Gen.* 2020. V. 149. № 11. P. 2084.
5. *van Dijk T.A., Kintsch W.* Strategies of discourse comprehension. New York, NY: Academic Press, 1983. 389 p.
6. *Perfetti C., Zhang S.* Very early phonological activation in Chinese reading // *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 1995. V. 21. № 1. P. 24.
7. *Perfetti C.A., Dunlap S.* Learning to read: General principles and writing system variations / Learning to read across languages. New York: Routledge, 2008. P. 25.
8. *Uno A., Wydell T.N., Haruhara N. et al.* Relationship between reading/writing skills and cognitive abilities among Japanese primary-school children: normal readers versus poor readers (dyslexics) // *Read. Writ.* 2009. V. 22. № 7. P. 755.
9. *Григоренко Е.Л., Эллиот Д.* Чтение о чтении. Воронеж: Аист, 2012. 416 с.
10. *Verhoeven L., Perfetti C.* Universals in Learning to Read Across Languages and Writing Systems // *Sci. Stud. Read.* 2021. P. 1.
<https://doi.org/10.1080/10888438.2021.1938575>
11. *Корнев А.Н.* Дислексия и дисграфия у детей. СПб.: Гиппократ, 1995. 224 с.
12. *Корнев А.Н., Ишимова О.А.* Методика диагностики дислексии у детей. Методические рекомендации. Учебно-методическое пособие для психологов и логопедов. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2010. 70 с.
13. *Henderson V.W.* Alexia and Agraphia from 1861 to 1965 // *Front. Neurol. Neurosci.* 2019. V. 44. P. 39.
14. *Лурия А.Р.* Высшие корковые функции человека. СПб.: Издательский дом: Питер, 2018. 768 с.
15. *Цветкова Л.С.* Нейропсихология счета, письма и чтения. М.: МОДЭК МПСИ, 2004. 360 с.
16. *Caramazza A., Coltheart M.* Cognitive neuropsychology twenty years on // *Cogn. Neuropsychol.* 2006. V. 23. № 1. P. 3.
17. *Вассерман Л.И., Дорофеева С.А., Меерсон Я.А.* Методы нейропсихологической диагностики. СПб.: Стройлеспечать, 1997. 303 с.
18. *Тонконогий И.М.* Введение в клиническую нейропсихологию. Ленинград: Медицина. Ленингр. отделение. 1973. 255 с.
19. *Гарах Ж.В., Ребрейкина А.Б., Стрелец В.Б. и др.* Нейрофизиологические механизмы чтения // *Ж. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова.* 2019. Т. 69. № 3. С. 294.
20. *Ребрейкина А.Б., Ларионова Е.В., Мартынова О.В.* Динамика вызванных потенциалов в процессе становления грамотности [Электронный ресурс] // Современная зарубежная психология. 2020. Т. 9. № 2. С. 21.
21. *Price C.J.* A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading // *Neuroimage.* 2012. V. 62. № 2. P. 816.
22. *Martin A., Schurz M., Kronbichler M., Richlan F.* Reading in the brain of children and adults: A meta-analysis of 40 functional magnetic resonance imaging studies // *Hum. Brain Mapp.* 2015. V. 36. № 5. P. 1963.
23. *Cohen L., Dehaene S., Naccache L. et al.* The visual word form area: spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients // *Brain.* 2000. V. 123. Pt. 2. P. 291.
24. *Pugh K.R., Mencl W.E., Jenner A.R. et al.* Neurobiological studies of reading and reading disability // *J. Commun. Disord.* 2001. V. 34. № 6. P. 479.
25. *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. UK: Oxford University Press, 2010. P. 281.
26. *Величковский Б.* Когнитивная наука. Основы психологии познания в 2 т. Т. 2. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2021. 485 с.
27. *Корнев А.Н.* Нарушения чтения и письма у детей. 2-е изд. СПб.: Речь, 2003. 330 с.
28. *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. 5.
29. *Kintsch W.* Revisiting the Construction—Integration Model of Text Comprehension and Its Implications for Instruction / *Theoretical models and processes of literacy.* UK: Routledge, 2018. P. 178.
30. *Van Dijk T.A., Kintsch W.* Cognitive psychology and discourse: Recalling and summarizing stories / *Current trends in text linguistics.* Berlin: Walter Gruyter, 2014. P. 61.
31. *Lachmann T., van Leeuwen C.* Reading as functional coordination: not recycling but a novel synthesis // *Front. Psychol.* 2014. V. 5. P. 1046.
32. *Friederici A.D., Lachmann T.* From Language to Reading and Reading Disability / *Basic Functions of Language, Reading and Reading Disability.* Neuropsychology and Cognition // Eds. Witruk E., Friederici A.D., Lachmann T. Springer, Boston, MA. 2002. V. 20. P. 9.
33. *Pritchard S.C., Coltheart M., Marinus E., Castles A.* A computational model of the self-teaching hypothesis based on the dual-route cascaded model of reading // *Cogn. Sci.* 2018. V. 42. № 3. P. 722.
34. *Sergent J., Zuck E., Levesque M., MacDonald B.* Positron emission tomography study of letter and object

- processing: empirical findings and methodological considerations // *Cereb. Cortex*. 1992. V. 2. № 1. P. 68.
35. Price C.J., Wise R.J., Watson J.D. et al. Brain activity during reading. The effects of exposure duration and task // *Brain*. 1994. V. 117. № 6. P. 1255.
 36. Price C.J., Wise R.J., Frackowiak R.S. Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords // *Cereb. Cortex*. 1996. V. 6. № 1. P. 62.
 37. Sanderson A.E. The idea of reading readiness: a re-examination // *Educational Research*. 1963. V. 6. № 1. P. 3.
 38. Mason J.M., Allen J. A review of emergent literacy with implications for research and practice in reading / Urbana-Champaign Library University of Illinois, 1986. 56 p. <https://core.ac.uk/download/4826477.pdf>
 39. Tunmer W.E., Bowey J.A. Metalinguistic awareness and reading acquisition / *Metalinguistic awareness in children: Theory, Research and Implications*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. P. 144.
 40. Teale W.H., Sulzby E. Emergent Literacy: Writing and Reading / *Writing Research: Multidisciplinary Inquiries into the Nature of Writing Series*. Norwood, NJ: Ablex Publishing Corporation, 1986. 218 p.
 41. Tunmer W.E., Herriman M.L., Nesdale A.R. Metalinguistic abilities and beginning reading // *Read. Res. Quart.* 1988. V. 23. № 2. P. 134.
 42. Whitehurst G.J., Lonigan C.J. Child development and emergent literacy // *Child Dev.* 1998. V. 69. № 3. P. 848.
 43. Эльконин Д.Б. Как учить детей читать. М.: Знание, 1976. 64 с.
 44. National Reading Panel (US), National Institute of Child Health, Human Development (US), National Reading Excellence Initiative, National Institute for Literacy (US), United States. Public Health Service, & United States Department of Health / *Report of the National Reading Panel: Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction: Reports of the subgroups*. National Institute of Child Health and Human Development, National Institutes of Health. 2000. 449 p.
 45. Snow C. Reading for understanding: Toward an R&D program in reading comprehension. Santa Monica, CA: Rand Corporation, 2002. 184 p.
 46. Fransman J. Understanding literacy: A concept paper. The EFA Global Monitoring Report / *Literacy for Life*. 2005. P. 31.
 47. van den Broek P., Rapp D.N., Kendeou P. Integrating Memory-Based and Constructionist Processes in Accounts of Reading Comprehension // *Discourse Processes*. 2005. V. 39. № 2–3. P. 299.
 48. Егоров Т.Г. Психология овладения навыком чтения: учеб. пособие. СПб.: КАРО, 2016. 264 с.
 49. Ehri L.C. The science of learning to read words: A case for systematic phonics instruction // *Read. Res. Quart.* 2020. V. 55. № 3. P. S45.
 50. Frith U. A developmental framework for developmental dyslexia // *Annals of dyslexia*. 1986. V. 36. № 1. P. 67.
 51. Корнев А.Н., Столярова Э.И., Гальперина Е.И., Гийемар Д.М. Формирование сенсомоторных механизмов продукции слога на начальном этапе усвоения чтения // *Педиатр*. 2014. № 5(4). С. 85.
 52. Выготский Л.С. Мышление и речь: Психологические исследования. М.: Национальное образование, 2016. 368 с.
 53. Карпова С.Н., Колобова, И.Н. Особенности ориентировки на слово у детей. М.: Изд. МГУ, 1978. 165 с.
 54. Ramus F. Outstanding questions about phonological processing in dyslexia // *Dyslexia*. 2001. V. 7. № 4. P. 197.
 55. Liberman I.Y., Shankweiler D. Phonology and the problems of learning to read and write // *Rem. Spec. Educ.* 1985. V. 6. № 6. P. 8.
 56. Ron Nelson J., Benner G.J., Gonzalez J. Learner characteristics that influence the treatment effectiveness of early literacy interventions: A meta-analytic review // *Learn. Disabil. Res. Pract.* 2003. V. 18. № 4. P. 255.
 57. Fletcher J.M., Stuebing K.K., Barth A.E. et al. Cognitive correlates of inadequate response to reading intervention // *School Psychol. Rev.* 2011. V. 40. № 1. P. 3.
 58. Gerst E.H., Cirino P.T., Fletcher J.M., Yoshida H. Cognitive and behavioral rating measures of executive function as predictors of academic outcomes in children // *Child Neuropsychol.* 2017. V. 23. № 4. P. 381.
 59. Ramus F., Altarelli I., Jednoróg K. et al. Neuroanatomy of developmental dyslexia: Pitfalls and promise // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2018. V. 84. P. 434.
 60. Семенова О.А. Формирование произвольной регуляции деятельности и ее мозговых механизмов в онтогенезе // *Физиология человека*. 2007. Т. 33. № 3. С. 115.
 61. Семенова О.А. The Ontogeny of voluntary control of activity and its cerebral mechanisms // *Human Physiology*. 2007. V. 33. № 3. P. 355.
 62. Семенова О.А., Кошельков Д.А., Мачинская Р.И. Возрастные изменения произвольной регуляции деятельности в старшем дошкольном и младшем школьном возрасте // *Культурно-историческая психология*. 2007. Т. 3. № 4. С. 39.
 63. Мачинская Р.И. Управляющие системы мозга // *Ж. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова*. 2015. Т. 65. № 1. С. 33.
 64. Казакова Е.В., Соколова Л.В. Показатели предшкольного периода развития как предикты школьной адаптации первоклассников // *Экология человека*. 2018. № 9. С. 27.
 65. Norton E.S., Beach S.D., Eddy M.D. et al. ERP mismatch negativity amplitude and asymmetry reflect phonological and rapid automatized naming skills in English-speaking kindergartners // *Front. Hum. Neurosci.* 2021. V. 15. Article 624617.
 66. Raschle N.M., Zuk J., Gaab N. Functional characteristics of developmental dyslexia in left-hemispheric posterior brain regions predate reading onset // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2012. V. 109. № 6. P. 2156.
 67. Dębska A., Łuniewska M., Chyl K. et al. Neural basis of phonological awareness in beginning readers with familial risk of dyslexia—Results from shallow orthography // *NeuroImage*. 2016. V. 132. P. 406.

67. Kovelman I., Norton E.S., Christodoulou J.A. et al. Brain basis of phonological awareness for spoken language in children and its disruption in dyslexia // *Cereb. Cortex*. 2012. V. 22. № 4. P. 754.
68. Yang X., Peng P., Meng X. How do metalinguistic awareness, working memory, reasoning, and inhibition contribute to Chinese character reading of kindergarten children? // *Infant Child Dev.* 2019. V. 28. № 3. P. e2122.
69. 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.
70. 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.
71. Centanni T.M., Norton E.S., Park A. et al. Early development of letter specialization in left fusiform is associated with better word reading and smaller fusiform face area // *Dev. Sci.* 2018. V. 21. № 5. P. e12658.
72. Centanni T.M., Norton E.S., Ozernov-Palchik O. et al. Disrupted left fusiform response to print in beginning kindergartners is associated with subsequent reading // *NeuroImage Clin.* 2019. V. 22. P. 101715.
73. James K.H., James T.W., Jobard G. et al. Letter processing in the visual system: different activation patterns for single letters and strings // *Cogn. Affect. Behav. Neurosci.* 2005. V. 5. № 4. P. 452.
74. James K.H. Sensori-motor experience leads to changes in visual processing in the developing brain // *Dev. Sci.* 2010. V. 13. № 2. P. 279.
75. Yamada Y., Stevens C., Dow M. et al. Emergence of the neural network for reading in five-year-old beginning readers of different levels of pre-literacy abilities: an fMRI study // *NeuroImage*. 2011. V. 57. № 3. P. 704.
76. van de Walle de Ghelcke A., Rossion B., Schiltz C., Lochy A. Developmental changes in neural letter-selectivity: A 1-year follow-up of beginning readers // *Dev. Sci.* 2021. V. 24. № 1. P. e12999.
77. Lochy A., Van Reybroeck M., Rossion B. Left cortical specialization for visual letter strings predicts rudimentary knowledge of letter-sound association in pre-schoolers // *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2016. V. 113. № 30. P. 8544-9.
78. Wang F., Karipidis I.I., Pleisch G. et al. Development of print-speech integration in the brain of beginning readers with varying reading skills // *Front. Hum. Neurosci.* 2020. V. 14. P. 289.
79. Rayner K., Clifton C., Jr. Language processing in reading and speech perception is fast and incremental: implications for event-related potential research // *Biol. Psychol.* 2009. V. 80. № 1. P. 4.
80. Maurer U., Zevin J.D., McCandliss B.D. Left-lateralized N170 Effects of Visual Expertise in Reading: Evidence from Japanese Syllabic and Logographic Scripts // *J. Cogn. Neurosci.* 2008. V. 20 № 10. P. 1878.
81. Laubrock J., Kliegl R. The eye-voice span during reading aloud // *Front. Psychol.* 2015. V. 6. P. 1432.
82. Fabiani M., Gratton G., Federmeier K.D. Event-related brain potentials: Methods, theory, and applications // *Handbook of psychophysiology* // Eds. Cacioppo J.T., Tassinary L.G., Berntson G.G. Cambridge University Press, 2007. P. 85.
83. 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.
84. 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.
85. Cantlon J.F., Pineda P., Dehaene S., Pelphey K.A. Cortical representations of symbols, objects, and faces are pruned back during early childhood // *Cereb. Cortex*. 2011. V. 21. № 1. P. 191.
86. Chiarenza G.A., Olgia P., Trevisan C. et al. Reading aloud: a psychophysiological investigation in children // *Neuropsychologia*. 2013. V. 51. № 3. P. 425.
87. 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.
88. 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.
89. 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.
90. 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.
91. Bakos S., Landerl K., Bartling J. et al. Deficits in letter-speech sound associations but intact visual conflict processing in dyslexia: results from a novel ERP-paradigm // *Front. Hum. Neurosci.* 2017. V. 11. № 71. P. 116.
92. Karipidis I., Pleisch G., Röthlisberger M. et al. Neural initialization of audiovisual integration in prereaders at varying risk for developmental dyslexia // *Hum. Brain Mapp.* 2017. V. 38. № 2. P. 1038.
93. Froyen D.J., Bonte M.L., van Atteveldt N., Blomert L. The long road to automation: neurocognitive development of letter-speech sound processing // *J. Cogn. Neurosci.* 2009. V. 21. № 3. P. 567.
94. 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.
95. Blackburne L.K., Eddy M.D., Kalra P. et al. Neural correlates of letter reversal in children and adults // *PLoS One*. 2014. V. 9. № 5. P. e98386.

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

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

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

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

^{*}*E-mail: galperina-e@yandex.ru*

^{**}*E-mail: k1949@yandex.ru*

The study of reading mechanisms is a relevant multidisciplinary fundamental scientific problem. Several reviews on the psychophysiology of reading have been published in Russian in recent years, but the current scientific data on the mechanisms of reading skill acquisition remain poorly covered, especially in relation to its initial stages. This review presents a synthesis of the data accumulated in cognitive psychology and psychophysiology on the mechanisms of the initial stage of reading mastery. A conceptual analysis of existing experimental data and theoretical approaches is attempted. Existing theories of the formation of cerebral subsystems of letter and non-letter symbol processing are discussed. The stages of skill formation, beginning with the pre-writing stage and the formation of metalanguage prerequisites, are examined; the nature and mechanisms of establishing sound-letter associations, brain mechanisms of selectivity and invariance of letter recognition depending on learning experience are discussed. This review includes predominantly methodologically uniform psychophysiological studies of the structural and functional support of reading: ERP-, fMRI- and MEG-studies involving children 4–10 years old.

Keywords: reading, acquisition, psychophysiology, psycholinguistics, recoding, decoding, children, initial stage.