

УДК 612.821

КОГНИТИВНЫЕ ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ ПРИ РЕШЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ У ПОДРОСТКОВ, ПРОЖИВАЮЩИХ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ СЕВЕРА РФ

© 2020 г. Ж. В. Нагорнова¹, *, Н. В. Шемякина¹, С. И. Сороко¹

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

*E-mail: nagornova_zh@mail.ru

Поступила в редакцию 01.10.2019 г.

После доработки 07.01.2020 г.

Принята к публикации 03.02.2020 г.

Решение математических задач — эксплицитно формируемый навык, который складывается в процессе школьного обучения. Цель работы состояла в исследовании зрительных когнитивных вызванных потенциалов (ВП) при решении математических примеров (сложение, вычитание) подростками (12–16 лет), проживающими в различных регионах Севера России: Архангельской ($n = 14$) и Мурманской (не-саами $n = 17$ и саами $n = 13$) областях. Для решения предлагались примеры в парадигме отложенного сличения ответа: проба состояла из 2-х стимулов — в начале пробы на 400 мс предъявлялся пример, затем, через 700 мс предъявлялся ответ — верный или неверный. Предъявление верного ответа испытуемые должны были опознавать нажатием кнопки мыши. Между группами детей были выявлены отличия амплитуды ВП при решении математических примеров — на интервале 220–270 мс после предъявления первого стимула, связанные с меньшей латентностью комплекса P2–N3 у подростков из Приполярного региона по сравнению с подростками из Заполярного региона. Также были выявлены отличия амплитуд позднего положительного компонента на интервале 430–530 мс (большие значения у подростков саами). Различия между группами наблюдались при предъявлении правильного решения и характеризовались большей латентностью отрицательного компонента ВП в лобных, центральных и теменных отведениях у подростков, проживающих в Заполярном регионе. Таким образом, в характеристиках ВП при решении математических задач могут проявляться различия, по всей видимости, связанные с особенностями развития детей, проживающих в различных регионах.

Ключевые слова: когнитивные вызванные потенциалы, подростки, Приполярный и Заполярный регионы.

DOI: 10.31857/S0131164620030133

Навык решения математических задач формируется эксплицитно во время школьного обучения. Как правило, одновременно происходит формирование и/или совершенствование логического и абстрактного мышления, освоение алгоритмов вычисления. Все это приводит к изменению стратегий вычисления — от вычисления путем пересчета и пространственного представления числового ряда к извлечению математических фактов из вербальной памяти [1–3]. В физиологических исследованиях с участием взрослых испытуемых было показано, что в условиях сличения ответа с предварительно решенным примером, предъявление ответа характеризуется возникновением раннего негативного компонента, волны P300 и поздним позитивным компонентом (*late positive component, LPC*). Амплитуда негативного компонента больше при предъявлении

неподходящего по сравнению с подходящим решением при решении различных математических примеров (умножение, вычитание), данный компонент имеет лобное распределение и подобен негативности рассогласования при возникновении с латентностью около 270 мс [4]. Ряд авторов рассматривает негативный компонент с латентностью пика около 400 мс, как специфический “арифметический” N400 [5–7], связанный с предъявлением неконгруэнтного решения. Амплитуда компонента P300 выше при предъявлении подходящего ответа, что связывают с реакцией на целевой стимул, в то время как поздний позитивный компонент, амплитуда которого выше при предъявлении неподходящего ответа, соотносится с перепроверкой решения в условиях сличения предъявляемого ответа с полученным в результате собственного вычисления. При этом

амплитуды компонентов N280, P300 и LPC, выявляемые при предъявлении подходящего или неподходящего ответа не различаются в зависимости от предварительных арифметических операций (сложение, умножение и др.) и связаны с процессами сличения уже имеющегося вычисленного и предъявленного решения [8]. Различия, выявленные при использовании разных стратегий поиска ответа (поэтапное вычисление или извлечение из памяти), описаны на этапе решения математической задачи, при предъявлении первого стимула – математического примера. По данным нейровизуализационных исследований в решение арифметических задач вовлечены лобные и теменные зоны коры [9]. Компоненты вызванных потенциалов условно можно разделить на более ранние, связанные с процессами восприятия стимулов и поздние – непосредственно связанные с когнитивными процессами обработки информации и принятия решения. На параметры (латентность и амплитуда) компонентов вызванных потенциалов могут влиять различные экзогенные и эндогенные факторы [10, 11], в том числе, социальные и условия проживания. В условиях Севера комплексное воздействие сложных природных и социальных факторов может определять особенности возрастного развития детей и оказывать влияние на темпы морфофункционального созревания мозга [12]. Целью данной работы была оценка влияния климатогеографических условий проживания на параметры когнитивных вызванных потенциалов у подростков-северян пришлого и коренного населения Европейского Севера России.

МЕТОДИКА

В ЭЭГ/ВП-исследовании принимали участие три группы подростков 12–16 лет с нормальным или скорректированным до нормального зрением. Первая группа – 14 чел. (8 мальчиков и 6 девочек, средний возраст 14.5 ± 1.6 лет), учащиеся общеобразовательной средней школы Архангельской области ($60^{\circ}51'$ с.ш., $39^{\circ}31'$ в.д.); вторая группа – 17 чел. (7 мальчиков и 10 девочек, средний возраст 14.1 ± 1.6 лет), учащиеся общеобразовательной средней школы Мурманской области ($68^{\circ}02'$ с.ш., $35^{\circ}00'$ в.д.), представители некоренного населения; третья группа – 13 чел. (6 мальчиков и 7 девочек, средний возраст 14.3 ± 1.4 лет), учащиеся общеобразовательной средней школы Мурманской области, представители коренного населения, саами.

Регистрация ЭЭГ/ВП. Для исследования ВП при решении математических задач использовали парадигму отложенного сличения ответа. Примеры для решения предъявлялись зрительно на мониторе компьютера, находящегося на расстоянии 1.5 м от испытуемого. Предъявление сти-

мулов было организовано в пробы. Каждая отдельная проба включала в себя предстимульный интервал 300 мс, затем на 400 мс предъявляли первый стимул – математический пример (сложение или вычитание), далее через 700 мс предъявляли второй стимул, длительностью 200 мс – ответ, который мог быть верным или неверным решением примера. Если ответ был верным, испытуемые должны были нажать на левую кнопку мыши указательным пальцем правой руки. Длительность пробы составляла 3000 мс, интервал между пробами – 100 мс. Всего предъявляли 100 проб с верным ответом и 100 проб с неверным ответом. Длительность регистрации ЭЭГ/ВП составляла 14–18 мин. Стимулы (примеры и решения) были начертаны черным шрифтом на белом фоне, шрифт *Times New Roman*, угловой размер первого стимула (примера) составлял около $3^{\circ}10' \times 1^{\circ}18'$ (по горизонтали и вертикали), угловой размер второго стимула (ответа) равнялся $0^{\circ}50' \times 1^{\circ}18'$. Регистрацию электроэнцефалограммы и вызванных потенциалов проводили с использованием электроэнцефалографа (“Мицар”, Россия) монополярно от 31 Ag/AgCl электрода, расположенного на поверхности головы по международной модифицированной системе 10–10. Частота квантования сигнала ЭЭГ составляла 500 Гц, в полосе регистрации 0.5–30 Гц с применением режекторного фильтра 45–55 и 95–105 Гц. Сопротивление электродов не превышало 10 кОм. Заземляющий электрод располагали на поверхности головы в фронто-центральной области, между электродами *Fpz* и *Fz*.

Для удаления артефактов использовали метод пространственной фильтрации путем обнуления независимых компонент ЭЭГ, соответствующих морганию глаз [13–15]. Далее из анализа исключали единичные пробы, которые содержали медленные волны (в диапазоне 0–1 Гц с амплитудой больше 50 мкВ), общая фильтрация ЭЭГ предполагала исключение волн с амплитудой больше 100 мкВ. При анализе усреднение ВП в ответ на первый (пример) и второй (ответ) стимулы пробы проводили отдельно для каждого типа проб, каждого отведения и каждого испытуемого.

Для статистического анализа значения амплитуд ВП для каждого подростка усредняли на выбранных интервалах после предъявления первого или второго стимула. Интервалы различий определяли по полумаксимуму разностной волны между ВП различных групп подростков в отведениях с наиболее выраженными различиями. Анализируемые интервалы следующие: после предъявления первого стимула (математического примера): 1) 220–270 мс, 2) 430–530 мс; после предъявления второго стимула – верного ответа: 390–470 мс, после предъявления неверного ответа – 430–530 мс. Статистический анализ проводили при помощи дисперсионного анализа

Таблица 1. Результаты выполнения математического задания

Показатель. Медиана (нижняя–верхняя квартиль)	Группа 1 (Архангельская обл.)	Группа 2 (Мурманская обл., не-саами)	Группа 3 (Мурманская обл., саами)
Количество пропусков ответов (отсутствие нажатия), %	6.5 (4.5–12)	5 (1–9)	17 (10–31)
Количество ложных ответов (неверные нажатия), %	13.5 (7–19)	6 (4–17)	12 (8–24)
Общее количество ошибок, %	11.6 (4.5–18.5)	7 (2.5–15)	14 (10.5–24.5)
Время ответа, мс	353 (311–378)	380 (339–414)	370 (365–420)

ANOVA для повторных измерений с внутригрупповыми факторами: ЗОНА (31 отведение) и ТИП СТИМУЛА (верный или неверный ответ) и категориальным предиктором ГРУППА (3 группы). Интервалы анализа различий после предъявления второго стимула связаны с возможными различиями N400-подобного компонента, поэтому для более глубокого анализа были определены амплитуды и латентности данного компонента в центральных отведениях F_z , FC_z , C_z , CP_z , P_z , как соответствующие минимуму во временном интервале 400–650 мс после предъявления стимула. Для анализа различий амплитуд и латентностей данного компонента использовали *ANOVA* для повторных измерений с внутригрупповыми факторами: ЗОНА (5 отведений) и ТИП СТИМУЛА (верный или неверный ответ) и категориальным предиктором ГРУППА (3 группы).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Результаты решения математических примеров. При выполнении математического задания во время регистрации ВП для оценки были получены следующие показатели (табл. 1): количество ошибок (нажатие на неверный ответ или пропуск верного ответа) и время ответа.

При сравнении поведенческих показателей между группами были выявлены различия в количестве пропусков правильных ответов: Краскала-Уоллиса: $H(2, N = 44) = 8.3, p = 0.015$, обусловленные большим количеством пропусков ответов в группе подростков Мурманской области: саами по сравнению с не-саами. В целом, большее количество пропусков правильных ответов, кроме непосредственно неверного вычисления примера, может быть связано со сниженным уровнем внимания или с тем, что к моменту предъявления возможного решения участники еще не вычислили свой ответ для сличения. Межгрупповых различий по другим показателям не наблюдалось. В каждой группе проводился анализ взаимосвязи между возрастом и измеренными показателями. Было выявлено отрицательная корреляция между временем ответа и возрастом в

группе 2 (Мурманская область, не-саами): $R_s = -0.5, t(N - 2) = -2.1, p = 0.049$. Между возрастом (12–16 лет) и показателями количества ошибок корреляций ни в одной группе выявлено не было. В группе 2 (Мурманская область, не-саами) наблюдалась положительная корреляция между временем ответа и количеством неправильных ответов (как пропусков правильных ответов, так и ложных нажатий): $R_s = 0.65, t(N - 2) = 3.3, p = 0.004$ и $R_s = 0.53, t(N - 2) = 2.4, p = 0.03$ соответственно. Более длительное время ответа у детей, совершающих большее количество ошибок, свидетельствует о том, что совершаемые ошибки, скорее всего, не связаны с импульсивностью.

Различия когнитивных ВП после предъявления первого стимула (математического примера). На интервале 220–270 мс, после предъявления первого стимула – математического примера, выявлен достоверный эффект взаимодействия факторов ЗОНА \times ГРУППА: $F_{60, 1230} = 3.6, e(G-G) = 0.09, p = 0.003$ (рис. 1). Различия наблюдались между группой подростков, проживающих в Архангельской области по сравнению с подростками, проживающими в Мурманской области. Согласно апостериорному анализу различия наблюдаются в отведениях: $Fp_1, Fpz, Fp_2, F_3, F_z, F_4, FC_3, FC_z, FC_4, C_3, C_z, C_4, CP_z, O_1, O_z, O_2$ – при сравнении с подростками не-саами и в отведениях: $F_3, FC_3, FC_z, C_3, C_z, C_4, CP_z, P_z, O_1, O_z, O_2$ – при сравнении с подростками-саами. Различия в указанном интервале связаны с большей латентностью компонентов P2 и N3 у подростков, проживающих в Заполярье. Латентность компонента P2 в отведении FC_z : в группе подростков из Архангельской области: латентность пика усредненного ВП равна 178 мс, амплитуда 4.6 мкВ; в группе подростков-саами латентность пика усредненного ВП равна 208 мс, амплитуда 5.3 мкВ; в группе подростков не-саами из Мурманской области: латентность пика усредненного ВП равна 208 мс, амплитуда 4.6 мкВ. Латентность N300-подобного компонента в отведении FC_z : в группе подростков из Архангельской области: латентность пика усредненного ВП равна 274 мс, амплитуда –3.3 мкВ; в группе

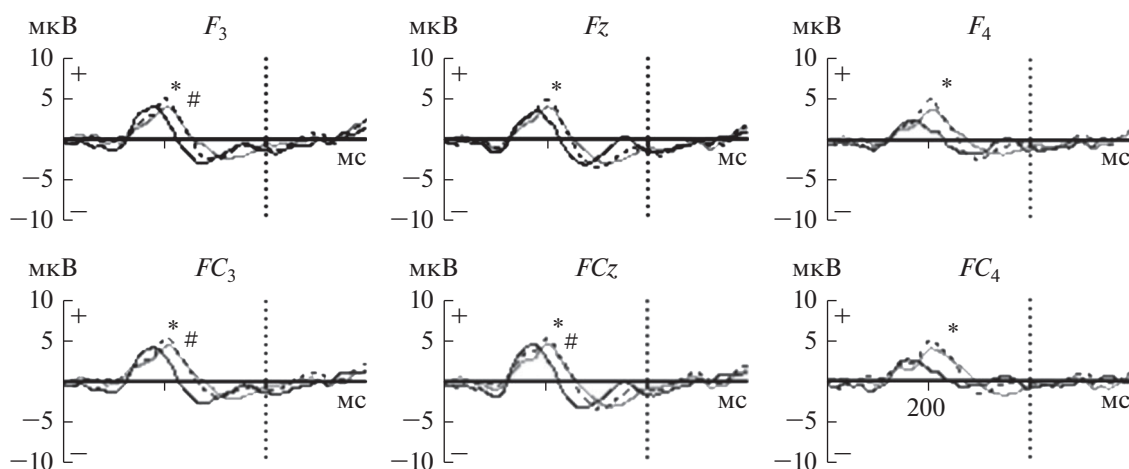


Рис. 1. Когнитивные ВП при предъявлении математического примера у подростков из различных регионов Севера. Черная линия – ВП подростков из Архангельской области; серая линия – ВП подростков Мурманской области, не саами; черная пунктирная линия – ВП подростков Мурманской области, саами. По оси x – время после предъявления стимула, мс; по оси y – амплитуда ВП, мкВ. Вертикальная черта – время окончания предъявления стимула (400 мс). * – значимые различия амплитуды ВП на интервале 220–270 мс, между подростками Приполярья и Заполярья не-саами; # – значимые различия амплитуды ВП на интервале 220–270 мс, между подростками Приполярья и подростками-саами из Заполярья.

подростков-саами латентность пика усредненного ВП равна 312 мс, амплитуда -3.4 мкВ; в группе подростков не-саами из Мурманской области: латентность пика усредненного ВП равна 324 мс, амплитуда -3.1 мкВ (рис. 1).

В более позднем временном интервале 430–530 мс после первого стимула наблюдается значимый эффект фактора ГРУППА: $F_{2, 41} = 5.6$, $p = 0.007$ и взаимодействие факторов ГРУППА \times ЗОНА: $F_{60, 1230} = 2.7$, $e(G-G) = 0.16$, $p = 0.004$. Амплитуда в указанном временном интервале выше в группе подростков-саами по сравнению с подростками не-саами из этого же (Мурманская область) и более южного (Архангельская область) региона. Топографически значимые различия наблюдаются в теменных областях (отведения CP_3 , CPz , CP_4 , Pz , P_4) – по сравнению с подростками Архангельской области и в центральных, теменных и затылочных областях (отведения C_3 , Cz , C_4 , CP_3 , CPz , CP_4 , TP_8 , T_5 , P_3 , Pz , P_4 , T_6 , O_1 , Oz , O_2) – по сравнению с подростками из Мурманской области.

Различия когнитивных ВП после предъявления второго стимула (верного или неверного ответа). На исследуемых интервалах различий после предъявления второго стимула (390–470 мс для верного ответа и 430–530 мс для неверного ответа) эффект взаимодействия факторов ЗОНА \times ГРУППА наблюдался в случае верного ответа: $F_{60, 1230} = 1.5$, $p = 0.009$ (без коррекции Гринхауза-Гейсера). Более подробный анализ зон интереса (центральные отведения Fz , FCz , Cz , CPz , Pz) выявил, что различия ВП после предъявления вто-

рого стимула (ответа) связаны с большей латентностью N400-подобного компонента у подростков, проживающих в Заполярном регионе по сравнению с подростками из Приполярья. Наблюдались следующие значимые эффекты: фактор ГРУППА – $F_{2, 41} = 3.8$, $p = 0.03$ (латентность значимо меньше в группе подростков из Приполярья); фактор ТИП СТИМУЛА – $F_{1, 41} = 83.7$, $p < 0.001$ (латентность компонента меньше при восприятии верного ответа во всех группах подростков); взаимодействие факторов ТЕСТ \times ЗОНА с учетом фактора ГРУППА: $F_{8, 164} = 3.1$, $e(G-G) = 0.6$, $p = 0.01$. Апостериорный анализ выявил значимо меньшую латентность при предъявлении верного ответа у подростков из Архангельской области в отведениях FCz , Cz , CPz – при сравнении с подростками не-саами Мурманской области и в отведениях FCz , Cz , CPz , Pz – при сравнении с подростками саами Мурманской области. При предъявлении неверного ответа латентность компонента в отведении Fz была меньше у подростков из Архангельской области по сравнению с подростками не-саами Мурманской области. Амплитуды компонента в различных областях между группами подростков не различались. Результаты исследования приведены в табл. 2.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Решение математических примеров в уме предполагает последовательность ментальных операций, включая определение (идентификацию) чисел, вычисление и запоминание ответа.

Таблица 2. Латентные периоды пика отрицательного компонента (N400) после предъявления верного и неверного ответа

Электрод	Латентность отрицательного компонента (среднее \pm SD, мс)			Различия между группами 1 и 2 (апостериорный анализ, НЗР Фишера), $p=$	Различия между группами 1 и 3 (апостериорный анализ, НЗР Фишера), $p=$
	группа 1 (Архангельская обл.)	группа 2 (Мурманская обл., не-саами)	группа 3 (Мурманская обл., саами)		
Предъявление верного ответа					
Fz	446 \pm 35	481 \pm 46	480 \pm 52	n.s.	n.s.
FCz	444 \pm 35	493 \pm 47	505 \pm 30	0.02	0.006
Cz	446 \pm 40	499 \pm 52	511 \pm 37	0.01	0.003
CPz	446 \pm 39	506 \pm 46	517 \pm 34	0.004	0.002
Pz	465 \pm 44	500 \pm 46	518 \pm 35	n.s.	0.02
Предъявление неверного ответа					
Fz	512 \pm 44	561 \pm 54	551 \pm 69	0.02	n.s.

Данные операции могут отражаться во временной последовательности компонентов вызванных потенциалов. Между группами подростков, проживающих в Приполярном и Заполярном регионах Европейского Севера России, были выявлены различия сенсорного компонента ВП – положительной волны с пиковой латентностью 178 и 208 мс, связанного с восприятием первого стимула – математического примера. При морфофункциональном развитии мозга латентности сенсорных компонентов ВП постепенно уменьшаются [16], к подростковому возрасту достигая зрелых значений [17, 18]. Различия данного компонента ВП вероятно отражают региональные различия темпов морфофункционального созревания интегративных систем головного мозга под влиянием суровых условий проживания на Севере [12]. Данный компонент ВП, с одной стороны, отражает восприятие сенсорных характеристик сигнала, однако подвергается влиянию и условий когнитивного задания. Так, в работе *Y. Iguchi* и *I. Hashimoto* [19] было показано, что N120–P180–N220 при суммировании предъявленных чисел (т.е. при совершении математических операций) имеет меньшую латентность в лобных, центральных и теменных областях левого полушария по сравнению с простым счетом и опознанием стимулов (188 \pm 31.3 мс по сравнению с 197 \pm 32 и 199 \pm 27 мс). Таким образом, сравнительно ранние компоненты ВП отражают обработку числового значения предъявленных цифр. Латентность негативного компонента с латентностью пика около 300 мс также различается между группами подростков Приполярного и Заполярного региона Севера. Данный компонент выделяется при предъявлении математических примеров и в ряде работ обозначается как арифметический N300 [8,

20]. Предполагается, что данный компонент связан с фонологическим, вербальным декодированием при решении математических примеров. Амплитуда данного компонента больше при решении задач при помощи извлечения ответов из вербальной памяти (например, в операциях умножения) по сравнению с задачами, решаемыми при помощи вычисления. На протяжении школьного обучения дети постепенно изменяют решения математических задач – от вычислительной стратегии (в том числе с опорой на пространственные представления) к извлечению математических фактов из памяти [21]. Согласно представлениям, у взрослых все основные математические факты хранятся и извлекаются из декларативной памяти [22]. Меньшая латентность данного компонента (арифметического N300) наблюдалась в группе подростков, проживающих в Приполярном регионе, по сравнению с обеими группами подростков из Заполярного региона. Следовательно, можно констатировать меньшую латентность всего комплекса P2–N3 при решении математических примеров подростками, проживающими в Приполярном регионе по сравнению с Заполярным. В более позднем временном интервале 430–530 мс основные различия связаны с большей амплитудой когнитивных ВП у подростков группы 3 (Мурманская область, саами), по сравнению с двумя другими группами. Различия наблюдаются в теменных (по сравнению с подростками Архангельской области) и в центральных, теменных и затылочных областях коры (по сравнению с подростками Мурманской области) с некоторым акцентом в правом полушарии. Данные различия могут быть соотнесены с поздним позитивным компонентом (*late positive component, LPC*), свя-

занным, как предполагается, с вычислительными операциями [19, 23]. Амплитуды поздних позитивных компонентов выше при решении математических задач по сравнению с контрольной деятельностью и могут быть связаны со сложностью задачи (например, при сложении двухзначных чисел) [23]. В нашем исследовании большая амплитуда позднего позитивного компонента у подростков-саами может соотноситься со стратегией решения математических примеров при помощи вычислительной стратегии с опорой на пространственное мышление и представление численного ряда [24]. С учетом того, что вычислительная стратегия поиска ответа не является самой продуктивной при решении простых математических примеров (без сложения двухзначных чисел), это может вызывать большее количество ошибок (пропусков нажатия при предъявлении верного решения) в группе подростков-саами. Для проверки данного наблюдения нами дополнительно проведен корреляционный анализ средней по всем отведениям амплитуды ВП в данном временном интервале (430–530 мс) и количества ошибок при решении математических задач. В общей группе детей (объединяющей все три группы) наблюдалась положительная корреляция средней амплитуды позднего положительного компонента и количества пропусков верного ответа: $R_s = 0.35$, $t(N - 2) = 2.5$, $p = 0.017$, а также общего количества ошибок: $R_s = 0.33$, $t(N - 2) = 2.3$, $p = 0.03$. Таким образом, амплитуда позднего положительного компонента ВП при решении математических задач может отражать и трудность данных вычислений для участников. В целом большая амплитуда когнитивных ВП во временном интервале поздних положительных компонентов у подростков-саами может соотноситься с вычислительной стратегией нахождения ответа. Большая активация теменных отделов коры с акцентом в правом полушарии может также соотноситься с генетическими и фенотипическими особенностями коренных жителей Севера, связанными с преобладанием правополушарного способа реагирования, нацеленного на восприятие многозначного контекста при решении когнитивных задач, и образного мышления [25, 26]. Ранее было показано, что при адаптации к условиям Севера, увеличивается доля лиц с преобладанием правополушарного способа реагирования — большей активации правого полушария при пространственном воображении. При этом в популяции коренных народов Севера доля лиц с такого рода межполушарной асимметрией выше, чем у жителей центральных регионов [25]. Теменные регионы мозга, такие как внутритеменная борозда, верхняя теменная извилина билатерально и левая угловая извилина играют роль в обработке числительной информации [27]. В нейромиджинговых исследованиях показано также во-

влечение теменных (нижняя теменная доля и предклинье) и лобных (верхней и средней лобной извилины) областей в математические вычисления [28]. Таким образом, большая амплитуда позднего позитивного компонента у подростков-саами в теменных областях коры может быть связана с вычислительной стратегией решения математических примеров и вовлечением пространственного мышления, по сравнению с подростками не-саами из других регионов проживания.

При сравнении ВП при предъявлении второго стимула различия наблюдаются в латентности отрицательного компонента соотносимого с компонентом N400, проявляющегося раньше у подростков из Приполярного региона по сравнению с подростками, проживающими в Заполярном регионе (табл. 2). Различия наблюдаются при предъявлении правильного ответа, в то время как при предъявлении неправильного ответа — только в одном отведении (F_z) наблюдается более короткий латентный период данного компонента у подростков из Приполярного региона по сравнению с Заполярным. Более ранние латентности данного компонента у подростков из Приполярного региона соотносятся и с результатами, наблюдаемыми при предъявлении первого стимула (математического примера). Данный эффект наблюдается преимущественно при предъявлении правильного ответа, что может быть связано с вовлечением механизмов внимания при верификации правильного ответа. При предъявлении правильного ответа в парадигме сличения ответа, в ВП возникает компонент P300, отражающий реакцию на предъявление целевого стимула, на который необходима ответная реакция. Предъявление неправильного решения вызывает возникновение негативности рассогласования — реакции на предъявление ответа, не соответствующего как вычисленному значению, так и заученному ответу — и позднего позитивного компонента, связанного со сличением и повторной верификацией ответа (верный/неверный). Таким образом, восприятие неверного ответа может сопровождаться большей когнитивной нагрузкой и требовать большего времени обработки, как было показано в ряде исследований [8]. Латентность негативного компонента, следующего за волной P300, оцениваемая в нашем исследовании, может отражать более быстрое протекание операций сличения правильного ответа и детекции целевого стимула в группе подростков Приполярного региона, в то время как при более напряженной когнитивной деятельности — при восприятии неверного ответа — различий в латентности соответствующих компонентов не выявлено. Можно предположить, что меньшая латентность данного компонента у детей из Приполярного региона по сравнению с Заполярным при восприятии верного ответа, связана

с более ранним протеканием комплекса P2–N3 при предъявлении математического примера (первого стимула) в данной группе детей. Таким образом, были выявлены различия ВП при предъявлении верного решения математического примера, связанные, по-видимому, с регионом проживания и отличающие подростков из Приполярного и Заполярного регионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В исследовании были выделены различия когнитивных ВП при решении математических примеров подростками Приполярного и Заполярного регионов двух этнических групп. Прежде всего, различия латентности возникновения комплекса P2–N3 при вычислении (предъявлении математических примеров), связаны с фактором “регион проживания” – у подростков Приполярного региона латентность комплекса меньше, чем у двух групп подростков Заполярного региона. Более поздний компонент ВП при предъявлении примеров (соотносимый с поздним положительным компонентом) схожим образом отличается у подростков-саами от подростков не-саами, и может быть обусловлено спецификой использования ими пространственного мышления при вычислении ответа. После предъявления ответа – различия преимущественно выявлены при предъявлении верного ответа и зависят от фактора “регион проживания” – выявляются между подростками из Приполярного региона и двумя группами подростков Заполярья. Реакция на предъявление правильного ответа может быть связана с механизмами внимания и сличения целевого стимула, и меньшая латентность отрицательного компонента соотносится с более ранним возникновением комплекса P2–N3 при вычислении ответа у подростков Приполярного региона. При восприятии неправильного ответа, сопровождающегося, предположительно, более сложными когнитивными операциями сличения и перепроверки ответа, региональных и межэтнических различий нет.

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

Информированное согласие. От родителей каждого участника исследования было получено письменное информированное согласие на участие ребенка в исследовании, исследование проводилось при добровольном желании ребенка.

Финансирование работы. Работа выполнена в рамках госзадания ИЭФБ РАН АААА-А18-118012290142-9.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Robinson K.M., Arbuthnott K.D., Rose D. et al.* Stability and change in children's division strategies // *J. Exp. Child Psychol.* 2006. V. 93. № 3. P. 224.
2. *Roussel J.L., Fayol M., Barrouillet P.* Procedural vs. direct retrieval strategies in arithmetic: A comparison between additive and multiplicative problem solving // *Eur. J. Cogn. Psychol.* 2002. V. 14. № 1. P. 61.
3. *Thevenot C., Castel C., Danjon J., Fayol M.* Identifying strategies in arithmetic with the operand recognition paradigm: a matter of switch cost? // *J. Exp. Psychol. Learn. Mem. Cogn.* 2015. V. 41. № 2. P. 541.
4. *Hsu Y.F., Szűcs D.* Arithmetic mismatch negativity and numerical magnitude processing in number matching // *BMC Neurosci.* 2011. V. 12. № 83. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-12-83>
5. *Jost K., Hennighausen E., Rösler F.* Comparing arithmetic and semantic fact retrieval: effects of problem size and sentence constraint on event-related brain potentials // *Psychophysiology.* 2004. V. 41. № 1. P. 46.
6. *Niedeggen M., Rösler F.* N400 effects reflect activation spread during retrieval of arithmetic facts // *Psychological Science.* 1999. V. 10. № 3. P. 271.
7. *Niedeggen M., Rösler F., Jost K.* Processing of incongruous mental calculation problems: Evidence for an arithmetic N400 effect // *Psychophysiology.* 1999. V. 36. № 3. P. 307.
8. *Jasinski E.C., Coch D.* ERPs across arithmetic operations in a delayed answer verification task // *Psychophysiology.* 2012. V. 49. № 7. P. 943.
9. *Menon V., Rivera S.M., White C.D. et al.* Dissociating prefrontal and parietal cortex activation during arithmetic processing // *NeuroImage.* 2000. V. 12. № 4. P. 357.
10. *Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В., Пряничников С.В., Сороко С.И.* Особенности пассивного восприятия звуковых стимулов у детей-северян в норме и при нарушениях психического развития // *Физиология человека.* 2016. Т. 42. № 2. С. 27. *Shemyakina N.V., Nagornova Z.V., Soroko S.I., Pryanichnikov S.V.* Passive perception of auditory stimuli in healthy and mild mentally retarded adolescents from Northern Russia // *Human Physiology.* 2016. V. 42. № 2. P. 137.
11. *Shemyakina N.V., Nagornova Z.V., Bekshaev S.S. et al.* Assessment of the parameters of cognitive potentials in adolescent northerners in health and developmental delays // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2018. V. 48. № 5. P. 534.
12. *Soroko S.I., Bekshaev S.S., Rozhkov V.P.* EEG correlates of genophenotypic characteristics of brain development in children of the aboriginal and settler populations in Northeast Russia // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2013. V. 43. № 7. P. 783.

13. *Vigário R.N.* Extraction of ocular artifacts from EEG using independent component analysis // *EEG and Clin. Neurophysiol.* 1997. V. 103. № 3. P. 395.
14. *Jung T.P., Makeig S., Humphries C. et al.* Removing electroencephalographic artifacts by blind source separation // *Psychophysiology.* 2000. V. 37. № 2. P. 163.
15. *Терещенко Е.П., Пономарев В.А., Кропотов Ю.Д., Мюллер А.* Сравнение эффективности различных методов удаления артефактов морганий при анализе количественной электроэнцефалограммы и вызванных потенциалов // *Физиология человека.* 2009. Т. 35. № 2. С. 124. *Tereshchenko E.P., Ponomarev V.A., Kropotov Yu.D., Müller A.* Comparative efficiencies of different methods for removing blink artifacts in analyzing quantitative electroencephalogram and event-related potentials // *Human Physiology.* 2009. V. 35. № 2. P. 241.
16. *Rojas-Benjumea M.Á., Sauqué-Poggio A.M., Barriga-Paulino C.I. et al.* Development of behavioral parameters and ERPs in a novel-target visual detection paradigm in children, adolescents and young adults // *Behav. Brain Funct.* 2015. V. 11. № 22. <https://doi.org/10.1186/s12993-015-0067-7>
17. *Shibasaki H., Miyazaki M.* Event-related potential studies in infants and children // *J. Clin. Neurophysiol.* 1992. V. 9. № 3. P. 408.
18. *Myatchin I., Lagae L.* Developmental changes in visuospatial working memory in normally developing children: event-related potentials study // *Brain Dev.* 2013. V. 35. № 9. P. 853.
19. *Iguchi Y., Hashimoto I.* Sequential information processing during a mental arithmetic is reflected in the time course of event-related brain potentials // *Clin. Neurophysiol.* 2000. V. 111. № 2. P. 204.
20. *Zhou X., Chen C., Dong Q. et al.* Event-related potentials of single digit addition, subtraction, and multiplication // *Neuropsychologia.* 2006. V. 44. № 12. P. 2500.
21. *Geary D.C., Bow-Thomas C.C., Liu F., Siegler R.S.* Development of Arithmetical Competencies in Chinese and American Children: Influence of Age, Language, and Schooling // *Child Dev.* 1996. V. 67. № 5. P. 2022.
22. *Domahs F., Delazer M.* Some assumptions and facts about arithmetic facts // *Psychology Science.* 2005. V. 47. № 1. P. 96.
23. *Ku Y., Hong B., Gao X., Gao Sh.* Spectra-temporal patterns underlying mental addition: An ERP and ERD/ERS study // *Neurosci. Lett.* 2010. V. 472. № 1. P. 5.
24. *Dehaene S.* Varieties of numerical abilities // *Cognition.* 1992. V. 44. P. 1.
25. *Аршавский В.В., Гельфгат Е.Л., Ротенберг В.С., Соловечук Л.Л.* Межполушарная асимметрия как фактор адаптации человека в условиях Севера // *Физиология человека.* 1989. Т. 15. № 2. С. 142. *Arshavskij V.V., Gelfgat E.L., Rotenberg V.S., Solovenchuk L.L.* [Interhemispheric asymmetry as a factor of human adaptation in the North] // *Fiziol. Cheloveka.* 1989. V. 15. № 2. P. 142.
26. *Rotenberg V.S., Arshavsky V.V.* Right and left brain hemispheres activation in the representatives of two different cultures // *Homeostasis in Health and Disease.* 1997. V. 38. № 2. P. 49.
27. *Dehaene S., Piazza M., Pinel P., Cohen L.* Three parietal circuits for number processing // *Cogn. Neuropsychol.* 2003. V. 20. № 3. P. 487.
28. *Arsalidou M., Pawliw-Levac M., Sadeghi M., Pascual-Leone J.* Brain areas associated with numbers and calculations in children: Meta-analyses of fMRI studies // *Dev. Cogn. Neurosci.* 2018. V. 30. P. 239.

Cognitive Event-Related Potentials in Arithmetic Task in Adolescents Living in Different Regions of Northern Russia

Zh. V. Nagornova^{a,*}, N. V. Shemyakina^a, S. I. Soroko^a

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

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

Mathematical problem solving is an explicitly formed skill formed during school education. We studied cognitive event-related potentials (ERPs) in solving mathematical equations (addition, subtraction) in adolescents (12–16 years) living in different regions of the Northern part of Russia: Arkhangelsk (n = 14) and Murmansk (non-Sami n = 17 and Sami n = 13) regions. The subjects were asked to solve delayed answer verification tasks consisting of two stimuli: the arithmetic equation (lasting 400 ms) and correct or incorrect answer (after 700 ms). The subjects had to press the left mouse button at correct answer. Differences in the ERP amplitude were observed at the interval of 220–270 ms after presentation of the first stimulus due to lower P2-N3 complex latency in adolescents from the Circumpolar region as compared with adolescents from the Polar region and at the interval of 430–530 ms due to higher amplitude of late positive component (LPC) in Sami adolescents. At the second stimulus presentation the latency of the negative N400-like ERP component in frontal, central and parietal areas was longer in adolescents living in the Polar compare to the Circumpolar Region. Thus, the characteristics of the ERP components during mathematical problem solving show differences probably related to the regional aspects of development in children.

Keywords: cognitive event-related potentials, adolescents, Circumpolar and Polar region.