

ВЫЗВАННЫЕ ПОТЕНЦИАЛЫ СРЕДНЕГО МОЗГА И КОРЫ ЧЕЛОВЕКА, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ОТВЕТ НА ПЕРЕХОД С СОГЛАСНОГО НА ГЛАСНЫЙ ЗВУК

© 2024 г. А. О. Канцерова^{1, *}, Л. Б. Окнина¹, Д. И. Пицхелаури², В. В. Подлепич²,
Я. О. Вологодина^{1, 2}, И. А. Зибер³, Е. В. Стрельникова¹

¹ФГБУН Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

²ФГАУ “Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии
имени академика Н.Н. Бурденко” МЗ РФ, Москва, Россия

³ФГАОУ ВО “Национальный исследовательский университет “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*E-mail: anna.kantserova@gmail.com

Поступила в редакцию 12.08.2023 г.

После доработки 18.07.2024 г.

Принята к публикации 28.08.2024 г.

Речь — это непрерывный поток звуков. Для восприятия речи необходимо во время ее звучания выделять дискретные единицы, имеющие различную частоту, громкость и длительность. Целью данного исследования было выявить ответы коры и среднего мозга человека на переход от согласного к гласному звуку в слого. В исследовании проводили анализ и сопоставление вызванных потенциалов (ВП), записанных при помощи глубинных электродов у 2 пациентов во время интраоперационного мониторинга (ИОМ), с ВП, записанными у 29 здоровых добровольцев с поверхности кожи головы. На ВП, зарегистрированных в ответ на слоги и гласные звуки, выявлялись группы пиков, следующие за началом звучания стимула и за переходом с согласного на гласный звук. На ВП пациентов выделялись сходные друг с другом группы коротколатентных пиков — *S* (от английского *start* — “начало”) и *C* (от английского *change* — “смена”), следующие за началом звучания стимула и за переходом с согласного на гласный звук соответственно. Их латентности не имели между собой достоверных различий ($p > 0.05$). Аналогично на ВП здоровых испытуемых выделялись сходные друг с другом комплексы длиннолатентных пиков NI_S - $P2_S$ и NI_C - $P2_C$. Их латентности также не имели между собой достоверных различий ($p > 0.05$). Во время звучания стимула кора выполняет высокоуровневую (когнитивную) обработку звука, в то же время средний мозг выполняет низкоуровневую (первичную) обработку, в первую очередь обеспечивая быструю передачу информации в кору. При патологиях слуховых структур таламуса и коры способность реагировать на изменение характеристик звука во время его звучания, в том числе в речи, с большой долей вероятности будет нарушена или утрачена.

Ключевые слова: вызванные потенциалы, средний мозг, кора, восприятие речи, слог.

DOI: 10.31857/S0131164624060013 **EDN:** AGSBFC

Человеческая речь представляет собой поток звуков различных частот, которые непрерывно сменяют друг друга. Для того чтобы распознавать значение сказанного, мозгу необходимо разделять звуковой поток речи на отдельные единицы [1–3]. Минимальной произносительной и перцептивной единицей речи является слог. Слогом обыкновенно называется суперсегментная единица, состоящая из максимально звучной (сонорной) вершины и менее звучной периферии. Вершина представлена всегда звуком самой высокой интенсивности (акустически — величины воздушного давления, перцептивно — громкости), который чаще всего является гласным. Периферией слога являются менее

интенсивные звуки с меньшим размером выходного отверстия; чаще всего это согласные [4]. Если согласные в слого отсутствуют, он состоит из одной только вершины. Простейшей слоговой структурой является сочетание согласного и гласного (либо просто один гласный); такие слоги имеются во всех языках мира [5]. В настоящей работе под слогом имеется в виду именно такой универсальный простейший слог, состоящий из согласного и гласного. Отдельные гласные звуки, которые тоже являются слогами, в работе для простоты называются просто гласными звуками.

Единого взгляда на то, как воспринимается мозгом речь, пока не существует, однако

предполагается, что в основе такого восприятия лежит интерференция звуков, а также весьма сильное огрубление их оценки [6]. Тем не менее нейрофизиологические механизмы восприятия сложных звуков, состоящих более чем из одного синусоидального тона, похожи на механизмы восприятия простых тонов [7]. В процессе восприятия простых тонов звуковые волны собираются ушной раковиной и во внутреннем ухе преобразуются в электрические сигналы, которые по волокнам слухового нерва передаются в ствол головного мозга. В стволе располагается ряд парных слуховых структур, в которых происходит дифференцировка звуков по их характеристикам: частоте, громкости и фазе звуковых колебаний [8]. При прохождении сигнала через каждую слуховую структуру ствола генерируется коротколатентный пик, которому присваивается обозначение римской цифрой в порядке появления компонентов: компонент I показывает сохранность проведения по слуховому нерву; компонент II — в кохлеарных ядрах продолговатого мозга; компонент III — в комплексе ядер верхней оливы моста мозга; компонент IV — по волокнам и ядрам латерального лемниска, которые также размещаются в мосте; компонент V — в нижних холмиках, входящих в состав среднего мозга; компонент VI — в медиальном коленчатом теле таламуса; компонент VII — в слуховой радиации внутренней капсулы, которая состоит из аксонов клеток медиального коленчатого тела таламуса, направляющихся в первичную слуховую кору [9]. Данные компоненты отражают проведение информации от слухового нерва и слуховых структур ствола к коре головного мозга [10]. Тем не менее в наших предыдущих работах при регистрации глубинными электродами из водопровода мозга также был выявлен длиннолатентный пик *E*, свидетельствующий о наличии анализа звуковой информации структурами среднего мозга [11].

После прохождения ствола мозга сигнал поступает выше — в слуховые структуры таламуса и коры, — где проводится анализ сложных звуков и их последовательностей [8]. Инструментом неинвазивной оценки механизмов звукового восприятия коры мозга человека служат скальповые слуховые вызванные потенциалы (ВП), которые регистрируются с поверхности кожи головы. На подобных ВП в ответ на простые тоны вслед за изменением акустической среды выделяется комплекс пиков *P1-N1-P2* (или *P50-N100-P200*), имеющий латентность 50–200 мс от изменения акустической среды [12, 13]. Такой комплекс регистрируется с поверхности кожи головы не только в ответ на простые звуковые стимулы, но и в ответ на речевые стимулы [14]. На скальповых ВП в ответ на слоги, которые состоят из двух отличающихся друг от друга по частоте и громкости звуков, выявляют два комплекса пиков *P1-N1-P2* [15, 16]. Первый из них выделяется

в ответ на начало слога, второй — после перехода от согласного звука к гласному.

Скальповые ВП также являются инструментом неинвазивной оценки активности среднего мозга человека. Выделяют два вида скальповых ВП, которые отражают функционирование слуховых структур среднего мозга человека: акустические стволовые вызванные потенциалы (АСВП) и потенциалы, следующие за частотой, или *frequency-following response (FFR)*. И АСВП, и *FFR* представляют собой ряд следующих друг за другом коротколатентных пиков. Поскольку АСВП, как правило, регистрируют в ответ на щелчок с длительностью примерно 0.5 мс, то АСВП не предоставляют сведений о каких-либо событиях, кроме начала звучания стимула [17]. Регистрация *FFR* производится при предъявлении более сложных звуковых стимулов [18]. В частности, вслед за началом звучания слога появляется группа пиков, характерная для АСВП, а вслед за ней — несколько коротколатентных пиков, появляющихся на протяжении звучания как согласного, так и гласного звуков [19]. Однако появляющиеся вслед за переходом от согласного звука к гласному пики в публикациях не описаны.

Также оценивать реакцию мозга на речевые стимулы можно инвазивным способом. В этом случае регистрируют потенциалы ближнего поля (*local field potential, LFP*) при помощи электродов, имплантируемых в ткань мозга по медицинским показаниям [20, 21]. Исследования восприятия речи стволовыми структурами мозга человека возможно при помощи глубинных электродов, устанавливаемых с целью стимуляции стволовых структур [22] или для проведения интраоперационного мониторинга [23].

Целью настоящего исследования было сопоставление обработки перехода с согласного на гласный звук слуховыми структурами среднего мозга и коры. Для достижения этой цели записывали ВП в ответ на различные слоги и гласные звуки у пациентов непосредственно от среднего мозга в ходе интраоперационного мониторинга и у здоровых испытуемых с поверхности кожи головы. Затем в полученных ВП выявляли компоненты, которые появлялись вслед за переходом от согласного к гласному звуку в слог.

МЕТОДИКА

В исследовании участвовали 2 пациента мужского пола возрастом 42 и 52 года, которые проходили хирургическое лечение доброкачественных новообразований четвертого желудочка в МНИЦ нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко МЗ РФ (г. Москва), а также 29 здоровых добровольцев (6 мужчин и 23 женщины; средний возраст 28 ± 10 лет).

У всех здоровых испытуемых не было патологий слуха и центральной нервной системы, в том числе эпилептиформных и локальных изменений на электроэнцефалограмме (ЭЭГ). В финальный анализ вошли 13 здоровых добровольцев (2 мужчин и 11 женщин), у которых в ответ на начало звучания слога был выявлен комплекс пиков NI_S - $P2_S$.

У всех пациентов отсутствовали признаки вовлечения в опухолевый процесс структур среднего мозга, не было патологий центральной нервной системы, нарушений слуха, пред- или послеоперационных когнитивных нарушений, а также других осложнений в послеоперационном периоде. На ЭЭГ пациентов не было выявлено эпилептической активности или других локальных изменений.

Регистрацию потенциалов у здоровых добровольцев осуществляли при помощи энцефалографа (“Нейроботикс”, Россия). Запись велась с 32 электродов, размещающихся на поверхности кожи головы испытуемых по международной системе 10–10%. В качестве референтных выступали мастиоидальные электроды с цифровым объединением. Заземляющим был электрод, расположенный в позиции *Fpz*. Во время регистрации потенциалов использовали фильтры 0.01–500 Гц, а также режекторный фильтр 50 Гц. Частота дискретизации записи была 2000 Гц. В анализ включали данные с отведения F_z .

Запись биопотенциалов пациентов проводили на электроэнцефалографе фирмы “Нейрософт” (Россия) с помощью глубинного электрода с тремя кольцевыми электродами-контактами: два дистальных – регистрирующие, а проксимальный – референтный. Частота дискретизации составляла 10 000 Гц, фильтры 0.01–4000 Гц, режекторный фильтр 50 Гц. Подробнее методика регистрации глубинных ВП (глВП) со среднего мозга во время ИОМ и строение глубинного электрода описаны ранее в работе [11].

Стимульную последовательность и пациентам, и здоровым добровольцам предъявляли бинаурально, через накладные наушники, при помощи программы *Presentation (Neurobehavioral Systems, Inc. США)*. Для предъявления стимулов использовали акустический стимулятор *AStim* (“Медицинские компьютерные системы”, Россия), который устанавливает метку с фиксированным смещением и нулевым разбросом относительно воспроизводимого звукового стимула. Подавали следующие стимулы с частотой дискретизации 44.1 кГц и разрядностью 16 бит:

1) гласные “а”, “и”, “о”, “э”, “у”, “ы” (длительностью 390 мс);

2) слоги “ба” (длительностью 380 мс), “га” (длительностью 326 мс), “да” (длительностью 389 мс), “ка” (длительностью 263 мс), “са” (длительностью 418 мс), “ша” (длительностью 418 мс), “па” (длительностью 305 мс).

Каждый стимул в последовательности, которую предъявляли пациентам, повторялся 85 раз, а в последовательности, которую предъявляли здоровым добровольцам, – 40 раз. Стимулы предъявляли в псевдослучайном порядке с одинаковой вероятностью появления.

Полученные записи обрабатывали в программе *Brainstorm toolbox (MATLAB)*. Обработка включала в себя визуальный анализ, фильтрацию в диапазоне 2–500 Гц и усреднение ВП.

ВП здоровых добровольцев назывались скальповыми ВП (скВП), а ВП пациентов – глубинными ВП (глВП). Оба типа ВП усредняли по одному алгоритму, относительно начала звукового стимула. Усреднение проводили отдельно по каждому слогу, с предстимульным интервалом 100 мс и постстимульным интервалом 800 мс.

За латентность комплекса пиков на глВП принимали латентность первого из пиков комплекса. Граница между согласным и гласным звуками в слоге устанавливали при помощи визуального и слухового анализа записей звуковых стимулов при проигрывании их в аудиоредакторе (табл. 1).

СкВП здоровых добровольцев усредняли между всеми испытуемыми отдельно по каждому стимулу (*grand mean*). Далее в выборку для статистического анализа включали *grand mean* скВП для всех стимулов.

В качестве контроля обоих типов ВП были рассчитаны псевдо-ВП. Для этого на записи в случайном порядке были расставлены 40 маркеров, относительно которых проводили усреднение.

В качестве статистического анализа латентностей пиков и групп пиков проводили сравнение групп значений по непараметрическому критерию Манна–Уитни в программе *STATISTICA 10 (Tulsa, США)*.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ *grand mean* скВП здоровых испытуемых в ответ на слоги с разницей между началом звучания согласного и началом звучания гласного звуков

Таблица 1. Латентность перехода с согласного на гласный звуки в слогах, используемых в качестве стимулов

Слог	ба	га	да	ка	са	ша	па
Латентность границы между согласным и гласным звуками, мс	154	49	161	34	196	199	8

более 150 мс — “ба”, “да”, “са”, “ша” — показал, что после перехода с согласного на гласный звук возникал комплекс пиков NI_C - $P2_C$ (рис. 1, А, В, Д). Вслед за началом звучания слога возникал комплекс пиков NI_S - $P2_S$ (рис. 1, А, В, Д).

На *grand mean* скВП здоровых испытуемых в ответ на слоги, у которых разница во времени между началом согласного звука и гласного составляла более 150 мс (слоги “ба”, “да”, “са”, “ша”), а также на гласные (“а”, “и”, “о”, “э”, “у”, “ы”)

непосредственно за началом звучания возникал комплекс пиков NI_S - $P2_S$ (рис. 1, Б, Г, Д).

Латентности пиков NI_S и $P2_S$, рассчитанные от начала звучания стимула, не имели статистически значимых отличий ($p > 0.05$ по методу Манна–Уитни) от латентностей пиков NI_C и $P2_C$, рассчитанных от перехода с согласного на гласный звук соответственно (табл. 2).

Анализ глВП пациентов в ответ на слоги “ба”, “га”, “да”, “ка”, “са”, “ша” показал, что непосредственно вслед за переходом с согласного на

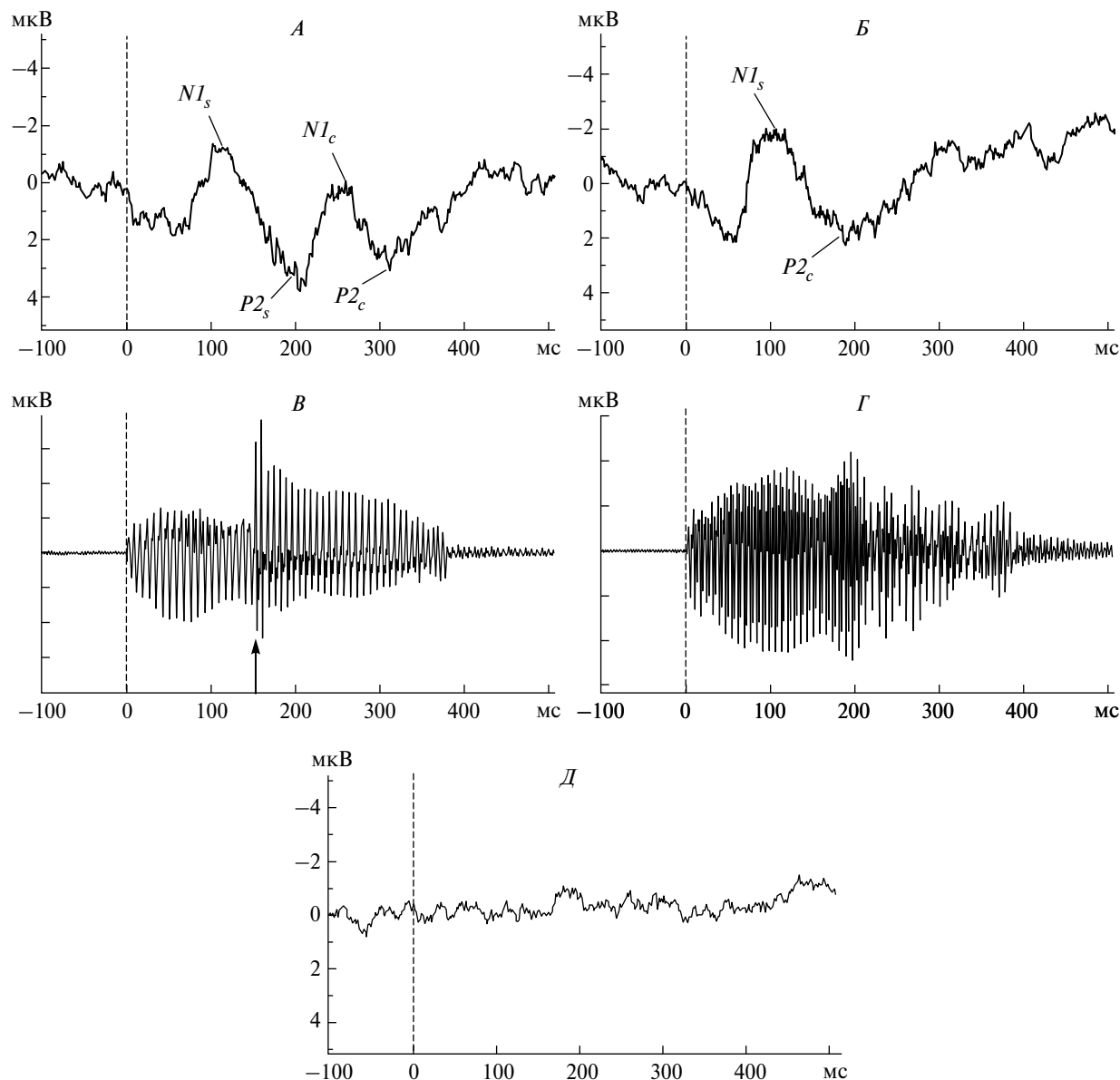


Рис. 1. Усредненные по всем испытуемым (*grand mean*) скальповые вызванные потенциалы (скВП) от отведения F_z и осциллограммы звуковых стимулов, в ответ на которые регистрировались данные скВП.

А — *grand mean* скВП в ответ на слог “ба”. Б — *grand mean* скВП в ответ на гласный звук “о”. В — осциллограмма слога “ба”. Стрелкой обозначена граница согласного и гласного звуков. Г — осциллограмма гласного звука “о”. Д — *grand mean* псевдо-скВП.

Таблица 2. Латентности пиков на скальповые вызванные потенциалы (скВП) здоровых испытуемых в ответ на слоги “ба”, “да”, “са”, “ша” и групп пиков на глубинные вызванные потенциалы (глВП) пациентов в ответ на слоги “ба”, “га”, “да”, “ка”, “са”, “ша”

Тип ВП	Пик или группа пиков	$Q1$, мс	Me , мс	$Q2$, мс	p (по критерию Манна–Уитни)
скВП (<i>grand mean</i>)	NI_S	97	105	113	0.7715
	NI_C	92	98	109	
	$P2_S$	189	215	223	0.0606
	$P2_C$	156	163	169	
глВП (пациент 1)	Группа пиков S	7.7	8.2	8.5	0.4712
	Группа пиков C	7.5	8.8	13.5	
глВП (пациент 2)	Группа пиков S	9	9.2	9.9	0.3776
	Группа пиков C	8.6	11	13.2	

гласный звук выделяется группа коротколатентных пиков C (от английского *change* – “смена”) (рис. 2, A , B , D). Сходная группа коротколатентных пиков S (от английского *start* – “начало”) выделялась в ответ на начало звучания слога (рис. 2, A , B , D). Латентности групп коротколатентных пиков S и C , вычисленные от начала звучания стимула и от перехода с согласного на гласный звук соответственно, не имели статистически достоверных различий ($p > 0.05$ по методу Манна–Уитни) (табл. 2). Также вслед за окончанием звучания стимула выделялся длиннотентный пик E , который подробно описан в наших работах [24].

На глВП, зарегистрированные в ответ на гласные (“а”, “и”, “о”, “э”, “у”, “ы” и на слог “па”), выделялась только группа коротколатентных пиков S вслед за началом звучания слога (рис. 2, B , G , D).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящем исследовании проводится анализ скВП, записанных с поверхности кожи головы здоровых испытуемых, и глВП, записанных от среднего мозга пациентов. На скВП в ответ на начало звучания слога и на переход с согласного на гласный звук регистрировались комплексы пиков NI_S - $P2_S$ и NI_C - $P2_C$ соответственно (рис. 1, A – D). Комплексы пиков NI_S - $P2_S$ и NI_C - $P2_C$ были схожи по форме. Пики NI_S и $P2_S$, а также NI_C и $P2_C$ не имели статистически достоверных различий в латентностях (табл. 2). И начало звучания слога, и переход с согласного на гласный звук являются изменением акустической среды. По вышеописанным фактам можно сделать заключение о том, что пики NI и $P2$ появляются в ответ на изменение акустической среды. Это утверждение согласуется с литературными данными, в которых описывается комплекс пиков $P1$ - NI - $P2$, возникающий через 50–200 мс после изменений акустической среды

[12–14]. Таким образом, переход с согласного на гласный звук в слоге оценивается мозгом как изменение акустической среды, и кора осуществляет высокоуровневую (когнитивную) обработку этого перехода.

Пик $P1$ плохо визуализировался на скВП по причине недостаточного числа усреднений. Кроме того, латентности пика $P2_S$ больше латентностей пика $P2_C$ из-за возможного слияния пиков $P2_S$ и $P1_C$. Пики NI_C и $P2_C$ не являются пиками $N200$ и $P300$, хотя и имеют схожие латентности, так как в ответ на стимул без перехода с согласного на гласный звук их не возникает (рис. 1, B , G , D).

На записях скВП пациентов, описанных в нашей работе, пиков NI и $P2$ выделено не было [24]. Этот факт согласуется с литературными данными об уплощении комплекса $P1$ - NI - $P2$ слуховых ВП при внутривенной инфузии пропофола [25].

На записях глВП пациентов сразу после начала звучания слога появлялась группа коротколатентных пиков S , а за переходом с согласного звука на гласный возникала группа коротколатентных пиков C (рис. 2, A – D). В ответ на слог “па” на глВП пациентов выделялась только одна группа коротколатентных пиков S , так как латентность перехода с согласного на гласный звук была меньше, чем латентность первой группы коротколатентных пиков. Группы пиков S и C были схожи по форме и не имели статистически достоверных различий в латентностях (табл. 2). Кроме того, по форме и латентности эти группы пиков были схожи с описанными в нашей работе группами пиков, возникающими в ответ на начало и окончание звучания простого тона [24]. В вышеописанной работе также была высказана гипотеза о том, что группы коротколатентных пиков, возникающие в ответ на начало и окончание звучания простого тона, с наибольшей вероятностью отражают проведение нервного импульса по слуховому пути. Таким образом,

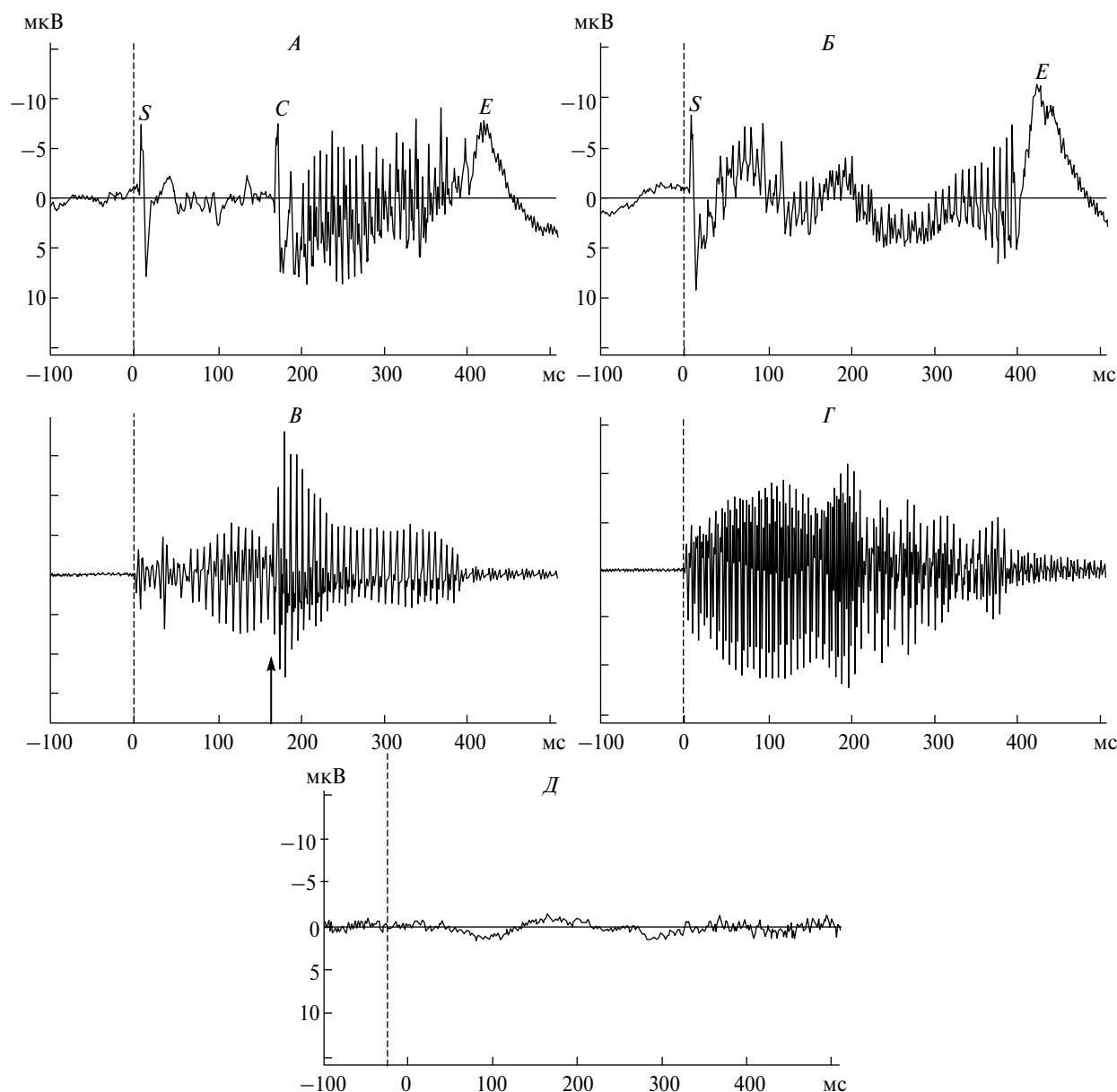


Рис. 2. Индивидуальные (для пациента 1) глубинные вызванные потенциалы (глВП) и осциллограммы звуковых стимулов, в ответ на которые регистрировались данные глВП.

А — глВП в ответ на слог “да”. *Б* — глВП в ответ на гласный звук “о”. *В* — осциллограмма слога “да”. Стрелкой обозначена граница согласного и гласного звуков. *Г* — осциллограмма гласного звука “о”. *Д* — псевдо-глВП.

в переходе с согласного на гласный звук средний мозг играет роль проведения слухового сигнала в кору, не осуществляя при этом высокоуровневую (когнитивную) обработку этого перехода.

При патологиях слуховых структур, расположенных выше среднего мозга, способность реагировать на изменения частоты, интенсивности и громкости звука во время его звучания, в том числе в речи, с большой долей вероятности будет нарушена или утрачена. Основная задача среднего

мозга во время звучания стимула — обеспечение максимальной скорости передачи слуховой информации в кору. Ранее нами было показано наличие на глВП пациентов длиннотентного и высокоамплитудного пика *Е*, который с наибольшей вероятностью отражает анализ звуковой информации структурами среднего мозга [24]. Следовательно, можно предположить, что при патологиях слуховых структур, расположенных выше среднего мозга, будет сохранена способность реагировать на

биологически значимые звуковые стимулы, разделенные между собой паузами.

К ограничениям исследования можно отнести малый объем выборки пациентов, невозможность оценить точное положение глубинных электродов, а также особенности предъявляемых стимулов и методы обработки ВП в ответ на эти стимулы. Записи биоэлектрических потенциалов пациентов являются единичными наблюдениями, полученными в рамках ИОМ. По этой причине для статистического анализа по ответам на ряд слогов у каждого из пациентов были сформированы две выборки латентностей — по одной для каждой группы пиков (S и C). Эти выборки и сравнивали между собой. Описанные в работе пики выявлялись у обоих участвовавших в исследовании пациентов, а также результаты и их статистическая достоверность также согласовывались между пациентами.

У здоровых испытуемых исследовались *grand mean* скВП, а не индивидуальные данные, так как на индивидуальных скВП не было видно пиков NI_S-P2_S и NI_C-P2_C . Для статистического анализа среди ответов на ряд слогов были сформированы выборки латентностей отдельно по каждому пику, которые затем сравнивались между собой.

В качестве иллюстраций показаны скВП в ответ на слог “ба” и глВП в ответ на слог “да”. Сравнивать ответы на два разных слога возможно, так как в настоящей работе переход с согласного на гласный звук рассматривается как смена частотного и амплитудного состава звукового стимула. Лингвистические аспекты слогов в настоящей работе не рассматриваются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ответ среднего мозга на начало звучания слога и на переход с согласного на гласный заключался в появлении на глВП группы коротколатентных пиков. Ответ коры головного мозга на начало звучания слога и на переход с согласного на гласный звук заключался в появлении на скВП комплексов длиннолатентных пиков.

Из вышесказанного можно заключить, что кора головного мозга осуществляет высокоуровневую (когнитивную) обработку перехода с согласного на гласный звук, а средний мозг осуществляет низкоуровневую (первичную) обработку этого перехода, которая заключается в дифференцировке слуховых стимулов по таким параметрам, как длительность, частота, интенсивность и фаза звуковых колебаний. Следовательно, можно предположить, что при патологиях слуховых структур, расположенных выше среднего мозга, способность реагировать на изменения частоты, интенсивности и громкости звука во время его звучания, в том числе в речи,

с большой долей вероятности будет нарушена или утрачена.

Финансирование работы. Исследование выполнено на средства Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ для ИВНД и НФ РАН (Москва); в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ (Москва).

Соблюдение этических стандартов. Все исследование проводилось в соответствии с принципами биомедицинской этики, изложенными в Хельсинкской декларации 1964 г. и последующих поправках к ней. Исследования проводились в рамках плановых научных тем и комплексного клинического обследования при оказании медицинской помощи в Национальном медицинском исследовательском центре нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко” МЗ РФ (Москва). Они также были одобрены местным этическим комитетом, протокол № 1 от 21.01.2016 г. Исследование с участием здоровых испытуемых было одобрено этическим комитетом Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва), протокол № 4 от 13.12.2022 г.

Каждый участник исследования дал добровольное письменное информированное согласие после получения разъяснений о потенциальных рисках и преимуществах, а также о характере предстоящего исследования.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Вклад авторов в публикацию. А.О. Канцерова — разработка методики, сбор данных, анализ данных, написание текста статьи. Л.Б. Окнина — управление проектом, разработка методики, сбор данных, анализ данных, редактирование текста статьи. Д.И. Пицхелаури — управление проектом, разработка методики, сбор и анализ данных, редактирование текста статьи. В.В. Подлепич — разработка методики, сбор и анализ данных, редактирование текста статьи. Я.О. Вологодина — нейропсихологическое тестирование, редактирование текста статьи. И.А. Зибер — разработка методики, консультирование, редактирование текста статьи. Е.В. Стрельникова — консультирование, редактирование текста статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Boruta L., Peperkamp S., Crabbé B., Dupoux E. Testing the robustness of online word segmentation: Effects of linguistic diversity and phonetic variation / Proceedings of the 2nd workshop on cognitive modeling and computational linguistics. Portland. Oregon. USA, 2011. P. 1.

2. Kuhl P.K. Early language acquisition: Cracking the speech code // Nat. Rev. Neurosci. 2004. V. 5. № 11. P. 831.
3. Shea C., Curtin S. Discovering the relationship between context and allophones in a second language: Evidence for distribution-based learning // Stud. Second Lang. Acquis. 2010. V. 32. № 4. P. 581.
4. Ashby M., Maidment J. Introducing phonetic science. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 230 p.
5. Кодзасов С.В., Кривнова О.Ф. Общая фонетика. М.: РГГУ, 2001. 592 с.
6. Oxenham A.J. How we hear: The perception and neural coding of sound // Annu. Rev. Psychol. 2018. V. 69. № 1. P. 27.
7. Lau B.K., Mehta A.H., Oxenham A.J. Superoptimal perceptual integration suggests a place-based representation of pitch at high frequencies // J. Neurosci. 2017. V. 37. № 37. P. 9013.
8. Kandel E.R., Koester J.D., Mack S.H., Siegelbaum S.A. Principles of neural science. 6th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2021. 1696 p.
9. Dorfman L.J. Sensory evoked potentials: clinical applications in medicine // Annu. Rev. Med. 1983. V. 34. P. 473.
10. Picton T.W., Hillyard S.A., Krausz H.I., Galambos R. Human auditory evoked potentials. I: Evaluation of components // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1974. V. 36. № 2. P. 179.
11. Канцеров А.О., Окнина Л.Б., Пицхелаури Д.И. и др. Вызванные потенциалы среднего мозга, ассоциированные с началом и окончанием звучания простого тона // Физиология человека. 2022. Т. 48. № 3. С. 5.
12. Nakagawa K., Otsuru N., Inui K., Kakigi R. Change-related auditory P50: A MEG study // NeuroImage. 2014. V. 86. P. 131.
13. Hillyard S.A., Picton T.W. ON and OFF components in the auditory evoked potential // Percept. Psychophys. 1978. V. 24. № 5. P. 391.
14. Kim J.R. Acoustic change complex: Clinical implications // J. Audiol. Otol. 2015. V. 19. № 3. P. 120.
15. Ostroff J.M., Martin B.A., Boothroyd A. Cortical evoked response to acoustic change within a syllable // Ear. Hear. 1998. V. 19. № 4. P. 290.
16. Kaukoranta E., Hari R., Lounasmaa O.V. Responses of the human auditory cortex to vowel onset after fricative consonants // Exp. Brain Res. 1987. V. 69. № 1. P. 19.
17. Eggermont J. Auditory brainstem response // Handb. Clin. Neurol. 2019. V. 160. P. 451.
18. Krizman J., Kraus N. Analyzing the FFR: A tutorial for decoding the richness of auditory function // Hear. Res. 2019. V. 382. P. 107779.
19. Johnson K.L., Nicol T., Zecker S.G. et al. Brainstem encoding of voiced consonant--vowel stop syllables // Clin. Neurophysiol. 2008. V. 119. № 11. P. 2623.
20. Nourski K.V., Steinschneider M., Rhone A.E. et al. Sound identification in human auditory cortex: Differential contribution of local field potentials and high gamma power as revealed by direct intracranial recordings // Brain Lang. 2015. V. 148. P. 37.
21. Moses D.A., Mesgarani N., Leonard M.K., Chang E.F. Neural speech recognition: Continuous phoneme decoding using spatiotemporal representations of human cortical activity // J. Neural. Eng. 2016. V. 13. № 5. P. 056004.
22. Parsons C.E., Young K.S., Joensuu M. et al. Ready for action: A role for the human midbrain in responding to infant vocalizations // Soc. Cogn. Affect. Neurosci. 2014. V. 9. № 7. P. 977.
23. Sala F., Lanteri P., Bricolo A. Motor evoked potential monitoring for spinal cord and brain stem surgery // Adv. Tech. Stand. Neurosurg. 2004. V. 29. P. 133.
24. Канцеров А.О., Окнина Л.Б., Пицхелаури Д.И. и др. Вызванные потенциалы среднего мозга человека, появляющиеся после окончания звучания простого тона // Журн. высш. нервн. деят. им. И.П. Павлова. 2022. Т. 72. № 5. С. 707.
25. Van Hooff J.C., De Beer N.A.M., Brunia C.H.M. et al. Event-related potential measures of information processing during general anesthesia // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1997. V. 103. № 2. P. 268.

REFERENCES

1. Boruta L., Peperkamp S., Crabbé B., Dupoux E. Testing the robustness of online word segmentation: Effects of linguistic diversity and phonetic variation / Proceedings of the 2nd workshop on cognitive modeling and computational linguistics. Portland. Oregon. USA, 2011. P. 1.
2. Kuhl P.K. Early language acquisition: Cracking the speech code // Nat. Rev. Neurosci. 2004. V. 5. № 11. P. 831.
3. Shea C., Curtin S. Discovering the relationship between context and allophones in a second language: evidence for distribution-based learning // Stud. Second Lang. Acquis. 2010. V. 32. № 4. P. 581.
4. Ashby M., Maidment J. Introducing phonetic science. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. 230 p.
5. Кодзасов С.В., Кривнова О.Ф. [General phonetics]. Moscow: RGGU, 2001. 592 p.
6. Oxenham A.J. How we hear: The perception and neural coding of sound // Annu. Rev. Psychol. 2018. V. 69. № 1. P. 27.
7. Lau B.K., Mehta A.H., Oxenham A.J. Superoptimal perceptual integration suggests a place-based representation of pitch at high frequencies // J. Neurosci. 2017. V. 37. № 37. P. 9013.

8. *Kandel E.R., Koester J.D., Mack S.H., Siegelbaum S.A.* Principles of neural science. 6th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2021. 1696 p.
9. *Dorfman L.J.* Sensory evoked potentials: clinical applications in medicine // *Annu. Rev. Med.* 1983. V. 34. P. 473.
10. *Picton T.W., Hillyard S.A., Krausz H.I., Galambos R.* Human auditory evoked potentials. I: Evaluation of components // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1974. V. 36. № 2. P. 179.
11. *Kantserova A.O., Oknina L.B., Pitskhelauri D.I. et al.* Evoked Potentials of the Midbrain Associated with the Beginning and End of a Sound of a Simple Tone // *Human Physiology.* 2022. V. 48. № 3. P. 229.
12. *Nakagawa K., Otsuru N., Inui K., Kakigi R.* Change-related auditory P50: A MEG study // *NeuroImage.* 2014. V. 86. P. 131.
13. *Hillyard S.A., Picton T.W.* ON and OFF components in the auditory evoked potential // *Percept. Psychophys.* 1978. V. 24. № 5. P. 391.
14. *Kim J.R.* Acoustic change complex: Clinical implications // *J. Audiol. Otol.* 2015. V. 19. № 3. P. 120.
15. *Ostroff J.M., Martin B.A., Boothroyd A.* Cortical evoked response to acoustic change within a syllable // *Ear. Hear.* 1998. V. 19. № 4. P. 290.
16. *Kaukoranta E., Hari R., Lounasmaa O.V.* Responses of the human auditory cortex to vowel onset after fricative consonants // *Exp. Brain Res.* 1987. V. 69. № 1. P. 19.
17. *Eggermont J.* Auditory brainstem response // *Handb. Clin. Neurol.* 2019. V. 160. P. 451.
18. *Krizman J., Kraus N.* Analyzing the FFR: A tutorial for decoding the richness of auditory function // *Hear. Res.* 2019. V. 382. P. 107779.
19. *Johnson K.L., Nicol T., Zecker S.G. et al.* Brainstem encoding of voiced consonant-vowel stop syllables // *Clin. Neurophysiol.* 2008. V. 119. № 11. P. 2623.
20. *Nourski K.V., Steinschneider M., Rhone A.E. et al.* Sound identification in human auditory cortex: Differential contribution of local field potentials and high gamma power as revealed by direct intracranial recordings // *Brain Lang.* 2015. V. 148. P. 37.
21. *Moses D.A., Mesgarani N., Leonard M.K., Chang E.F.* Neural speech recognition: Continuous phoneme decoding using spatiotemporal representations of human cortical activity // *J. Neural. Eng.* 2016. V. 13. № 5. P. 056004.
22. *Parsons C.E., Young K.S., Joensuu M. et al.* Ready for action: A role for the human midbrain in responding to infant vocalizations // *Soc. Cogn. Affect. Neurosci.* 2014. V. 9. № 7. P. 977.
23. *Sala F., Lanteri P., Bricolo A.* Motor evoked potential monitoring for spinal cord and brain stem surgery // *Adv. Tech. Stand. Neurosurg.* 2004. V. 29. P. 133.
24. *Kantserova A.O., Oknina L.B., Pitskhelauri D.I. et al.* Evoked potentials appearing in the human midbrain after sounding of a simple tone // *Neurosci. Behav. Physiol.* 2023. V. 53. № 3. P. 358.
25. *Van Hooff J.C., De Beer N.A.M., Brunia C.H.M. et al.* Event-related potential measures of information processing during general anesthesia // *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1997. V. 103. № 2. P. 268.

Evoked Potentials of the Human Midbrain and Cortex Registered in Response to the Transition from a Consonant to a Vowel Sound

A. O. Kantserova^{a, *}, L. B. Oknina^a, D. I. Pitskhelauri^b, V. V. Podlepich^b, Y. O. Vologdina^{a, b},
I. A. Sieber^c, E. V. Strelnikova^a

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

^b*N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery, Moscow, Russia*

^c*National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia*

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

Speech is a continuous stream of sounds. To perceive speech, it is necessary to allocate discrete units with different frequency, volume and duration during its sounding. The purpose of this study was to identify the responses of the human cortex and midbrain to the transition from a consonant to a vowel sound in a syllable. The study analyzed and compared evoked potentials (EP) recorded using deep electrodes in 2 patients during intraoperative monitoring (IOM) with EP recorded in 29 healthy volunteers from the head surface. Groups of peaks following the beginning of the stimulus sound and the transition from consonant to vowel sound were detected on the EP registered in response to syllables and vowel sounds. Similar groups of short-latency peaks – S (from “start”) and C (from “change”), following the beginning of the stimulus sound and the transition from consonant to vowel sound, respectively, were distinguished on the patients’ EP. Their latencies had no significant differences ($p > 0.05$). Similarly, complexes of long-latent peaks $N1_s$ - $P2_s$ and $N1_c$ - $P2_c$, similar to each other, were isolated on the EP of healthy volunteers. Their latencies also had no significant differences ($p > 0.05$). During the sounding of the stimulus, the cortex performs high-level (cognitive) sound processing, while the midbrain performs low-level (primary) processing, firstly providing rapid transmission of information to the cortex. With pathologies of the auditory structures of the thalamus and cortex, the ability to respond to changes in the characteristics of sound during its sounding, including speech, is likely to be impaired or lost.

Keywords: evoked potentials, midbrain, cortex, speech perception, syllable.