

Карлов В.А.¹, Шкловский В.М.², Коновалов Р.Н.³, Петрушевский А.Г.², Золовкина В.С.¹

¹Кафедра нервных болезней лечебного факультета ФГБОУ ВО «Московский государственный медико-стоматологический университет им А.И. Евдокимова» Минздрава России, Москва, Россия; ²ГБУЗ «Центр патологии речи и нейрореабилитации» — Московский научно-исследовательский институт психиатрии, филиал ФГБУ «Федеральный медицинский исследовательский центр психиатрии и наркологии им. В.П. Сербского» Минздрава России, Москва, Россия; ³ФГБУ «Научный центр неврологии», Москва, Россия

¹127473, Москва, ул. Десятская, 20, стр.1; ²119991, Москва, Малый Кропоткинский пер., 23; ³125367, Москва, Волоколамское шоссе, 80

Характеристика просодии речевой системы у здоровых добровольцев, регистрируемая при помощи функциональной магнитно-резонансной томографии

В настоящее время многие механизмы мозговой организации речевых процессов остаются недостаточно изученными.

Цель исследования — оценка структурно-функциональной организации речевой просодии с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии. Этот метод позволяет неинвазивно исследовать организацию речевой системы.

Пациенты и методы. С помощью предложенных нами трех парадигм оценивали речевую просодию у здоровых добровольцев. Первая парадигма была направлена на определение интонационной характеристики предложения, вторая — на изучение заданного акцентуированного и неакцентуированного ритмов, третья — на узнавание мелодии.

Результаты и обсуждение. При выполнении первой парадигмы наблюдалась двусторонняя активация речевой зоны Вернике (поле Бродмана 22), значительно превалявавшая по объему и интенсивности в правом полушарии головного мозга. Также, преимущественно в правом полушарии, отмечена активация дополнительной моторной области, включенной в цитоархитектоническое поле Бродмана 6. При определении ритма в правом полушарии достоверно активировалось поле Бродмана 9, а во время узнавания мелодии — поле Бродмана 46. Отмечена активация мозжечка, лимбической системы, подкорковых структур и др., что позволяет рассматривать речевую функцию как целостный мозговой процесс.

Заключение. Исследование подтвердило участие в системной организации речи различных отделов обоих полушарий головного мозга, что позволяет говорить о содоминантности полушарий по данной функции. Представленные парадигмы полностью отвечают задачам исследования и могут использоваться для картирования просодических характеристик речи.

Ключевые слова: функциональная магнитно-резонансная томография; просодия речи; речевая парадигма; правое полушарие.

Контакты: Владимир Алексеевич Карлов; v_karlov@barnsly.ru

Для ссылки: Карлов ВА, Шкловский ВМ, Коновалов РН и др. Характеристика просодии речевой системы у здоровых добровольцев, регистрируемая при помощи функциональной магнитно-резонансной томографии. Неврология, нейропсихиатрия, психосоматика. 2017;9(4):17–25.

Speech prosodic characteristics recorded by functional magnetic resonance imaging in healthy volunteers

Karlov V.A.¹, Shklovsky V.M.², Kononov R.N.³, Petrushevsky A.G.², Zolovkina V.S.¹

¹Department of Nervous System Diseases, Faculty of General Medicine, A.I. Evdokimov Moscow State University of Medicine and Dentistry, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia; ²Center for Speech Pathology and Neurorehabilitation, Moscow Research Institute of Psychiatry, Branch, V.P. Serbsky Federal Medical Research Center of Psychiatry and Narcology, Ministry of Health of Russia, Moscow, Russia; ³Research Center of Neurology, Moscow, Russia

¹20, Delegatskaya St., Build. 1, Moscow 127473; ²23, Malyy Kropotkinsky Lane, Moscow 119991; ³80, Volokolamskoe Shosse, Moscow 125367

Many mechanisms for the brain organization of speech processes remain poorly understood now.

Objective: to assess the structural and functional organization of speech prosody, by applying functional magnetic resonance imaging (fMRI). This technique allows non-invasive studies of the organization of the speech system.

Patients and methods. Using their proposed three paradigms, the authors evaluated speech prosody in healthy volunteers. The first paradigm was aimed to determine the intonation characteristics of a sentence; the second paradigm is to study the given accentuated and non-accentuated rhythms, and the third to recognize melodies.

Results and discussion. In the first paradigm, there was bilateral activation of Wernicke's speech area (Brodmann's Area 22) that significantly prevailed in volume and intensity in the right hemisphere of the brain. Also, the right hemisphere predominantly showed activation of the supplementary motor region included in cytoarchitectonical Brodmann's Area 6. There was a significant activation Brodmann's Area 9 when a rhythm was determined in the right hemisphere and in Brodmann's Area 46 when melodies were recognized. The cerebellum, limbic system, subcortical structures, etc. were noted to be activated, which permits speech function to be regarded as a whole brain process.

Conclusion. The investigation has confirmed that different regions of both hemispheres of the brain are involved in the systemic organization of speech, which enables the authors to speak about the codominance of the hemispheres in respect of this function. The presented paradigms fully meet the objectives of the study and can be used to map the prosodic characteristics of speech.

Keywords: functional magnetic resonance imaging; speech prosody; verbal paradigm; right hemisphere.

Contact: Vladimir Alekseevich Karlov; v_karlov@barnsly.ru

For reference: Karlov VA, Shklovsky VM, Kononov RN, et al. Speech prosodic characteristics recorded by functional magnetic resonance imaging in healthy volunteers. *Nevrologiya, neiropsikhiatriya, psikhosomatika* = Neurology, neuropsychiatry, psychosomatics. 2017;9(4):17–25.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14412/2074-2711-2017-4-17-25>

Одной из филогенетически новых функций больших полушарий головного мозга, присущей только человеку, является речь. Она создает свою анатомическую базу в виде особых цитоархитектонических полей.

Становление речевых функций в филогенезе, развитие знаний об организации речевой системы и доминантности полушарий по данной функции рассмотрены нами ранее [1].

Цель исследования — оценка структурно-функциональной организации речевой просодии.

Речь — не только особая форма общения, но и механизм интеллектуальной деятельности, средство организации и регуляции собственных психических процессов, она участвует во всех сложных формах психической деятельности. Речь является важным средством передачи эмоционального состояния. Правильная интонация в речи может не просто донести до собеседника смысл высказывания, она представляет собой инструмент сильнейшего эмоционального воздействия. Составляющими речи являются: ее темп и мелодия, тембр голоса, фразовое ударение, паузы. Все звуки, произносимые человеком, имеют свою природу и содержание. Акустические сигналы, передающие речевую (голосовую) эмоцию, сопровождаются различными физиологическими компонентами (частотой сердечных сокращений, распределением церебрального кровотока, мышечным напряжением), которые изменяются, как и эмоциональное состояние человека [2].

В речевом процессе эмоции передаются через два основных канала: семантический и просодический [3]. *Семантика* подразумевает применение слов для обозначения предметов, явлений, действий, выражения мыслей. *Просодия* представляет собой фонетическую систему, необходимую для различения речевых смыслов путем анализа интонационных характеристик речи.

Внедрение в медицинскую практику новейших методов нейровизуализации, в том числе функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), расширяет возможности изучения системы организации речи неинвазивным способом. В основе фМРТ лежит процесс повышения локального кровотока в ответ на увеличение регионарной мозговой активности и как следствие — снижение уровня дезоксигемоглобина и повышение уровня оксигемоглобина (BOLD-эффект — blood oxygen level-dependent) при выполнении испытуемым определенных заданий (парадигм), состоящих из чередования активных состояний с фазами покоя [4].

В последнее время появилось большое количество работ, в основном зарубежных, посвященных исследованию речевых функций с помощью фМРТ. В то же время обсуждение наших данных в свете этих публикаций в значительной степени ограничено из-за уникальности каждой из предлагаемых парадигм, разнообразия условий и задач исследования и сложности структурно-функциональной организации речевой системы.

В ряде отечественных работ использовался подобный метод исследования, но все они сконцентрированы на изучении речевой организации с акцентом на функционировании и поражении левого полушария [5, 6]. Изучалась номинативная функция речи у 40 здоровых добровольцев и 8 пациентов нейрохирургического стационара с поражением лобной доли ведущего по речи полушария [7]. Известны единичные отечественные исследования последних лет, посвященные изучению речевой организации правого полушария, однако одно из них выполнено на модели шизофрении [8], а во втором использован только нейропсихологический подход [9].

Пациенты и методы. В исследование включен 21 испытуемый (15 женщин и 6 мужчин) в возрасте от 27 до 65 лет (средний возраст — 43 года). При МРТ в стандартных режимах у них не выявлено патологических изменений вещества головного мозга, а также неврологических, психических, сердечно-сосудистых заболеваний, в том числе повышения артериального давления >140/80 мм рт. ст., эндокринопатии. Все испытуемые не имели алкогольной зависимости, не курили и не принимали систематически лекарственные средства. Все они были правши, что подтверждено с помощью эдинбургского теста для определения рабочей руки.

Парадигмы. Все задания были заблаговременно показаны участникам и прорепетированы до начала исследования. Использовалась зрительная и слуховая презентация стимулов. Задания из пульта вывели на экран монитора, установленный в ногах испытуемого, откуда через зеркальную систему изображения они были непосредственно доступны его восприятию. Слуховые стимулы подавали через наушники.

Были использованы три различные парадигмы с тремя сессиями сканирования соответственно. Каждая парадигма имела блоковую структуру: 8 блоков чередующихся периодов активации и покоя. Длительность парадигмы составила 4,05 мин (каждый блок — по 30 с). Каждая сессия сканирования начиналась с периода покоя, во время которого пациенты фиксировали взгляд на точку, выводимой на экран. Далее следовал период активации, во время которого испытуемым предъявляли ряд слайдов с различными для каждой парадигмы стимулами.

Для *первой парадигмы* был выбран стимул определения интонационной характеристики предложения (вопросительная, восклицательная и повествовательная формы). В качестве вариантов были предложены русские пословицы и поговорки со скрытым смыслом, например: «Пустить козла в огород», «Тише едешь — дальше будешь». Все слуховые стимулы были записаны с помощью профессионального диктора (женского пола) в студии звукозаписи. В качестве визуального стимула предлагали три варианта интонации, обозначенные символами: «.», «?», «!». Задача испытуемого заключалась в соотнесении звукового и зрительного стимулов при помощи нажатия кнопки на пульте, соответствующей номеру варианта.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И МЕТОДИКИ

Зоны активации для каждой из трех парадигм

Локализация зоны активации	Поле	Координаты (MNI)		
	Бродмана	x	y	z
Первая парадигма (определение интонационной характеристики предложения)				
Right Cerebrum, superior temporal gyrus, Wernicke's area	22	62	-18	0
Right Cerebrum, Parietal Lobe, Sub-Gyral, Gray Matter	22	28 46	-58 -36	38 54
Left Cerebellum, Cerebellum Anterior Lobe, Culmen , Cerebellum _6	22	-30 -20	-58 -56	-28 -24
Вторая парадигма (определение заданного ритма)				
Left Cerebrum, Occipital Lobe	18	-28	-98	-2
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Middel Frontal Gyrus	9	42	14	34
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Middel Frontal Gyrus	6	42	4	58
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Inferior Frontal Gyrus	6	44	26	-2
Left Cerebellum, Cerebellum Posterior Lobe, Cerebellum _6	6	-28	-62	-28
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Medial Frontal Gyrus, Supp motor area	6	4	16	48
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Superior Frontal Gyrus, Supp motor area	6	6	24	58
Left Cerebrum, Frontal Lobe, Medial Frontal Gyrus, Supp motor area	6	-4	10	50
Left Cerebrum, Sub-Lobar, Thalamus, Ventral Posterior Lateral Nucleus	6	-16	-18	6
Left Cerebrum, Sub-Lobar, Extra-Nuclear	6	-18	2	14
Третья парадигма (узнавание мелодии)				
Left Cerebrum, Occipital Lobe	18	38	-94	-6
Мозжечок LB/ Uvula/ Vermis 8	18	0	-66	-36
Right Cerebrum, Occipital Lobe, Fusiform Gyrus	18	42	-70	-20
Left Cerebrum, Frontal Lobe, Middle Frontal Gyrus	46	-48	20	28
Left Cerebrum, Sub-Lobar, Insula	46	-34	20	2
Left Cerebrum, Parietal Lobe, Superior Parietal Lobe	7	-22	-66	44
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Medial Frontal Gyrus, Supp_Motor_Area	7	8	20	48
Left Cerebrum, Frontal Lobe, Medial Frontal Gyrus, Supp_Motor_Area	7	-6	10	52
Right Cerebrum, Frontal Lobe, Superior Frontal Gyrus, Supp_Motor_Area	7	6	12	60
Right Cerebrum, Midbrain	7	8	-22	-16
Right Cerebrum, Pons	7	6	-34	-28
Right Cerebrum, Parietal Lobe, Sub-Gyral	7	26	-58	38
Right Cerebrum, Parietal Lobe, Superior Parietal Lobule	7	28	-60	56
Right Cerebrum, Parietal Lobe, Inferior Parietal Lobule	40	40	-48	40
Примечание. p<0,001.				

Во второй парадигме использовали тесты, целью которых было определение заданного акцентуированного и неакцентуированного ритмов. Ритмы также были записаны на профессиональном звуковом оборудовании. Задача испыту-

емого, как и в первом задании, состояла в соотношении звукового и зрительного стимулов.

В третьей парадигме нужно было узнать мелодию. На экране монитора демонстрировались названия трех разных

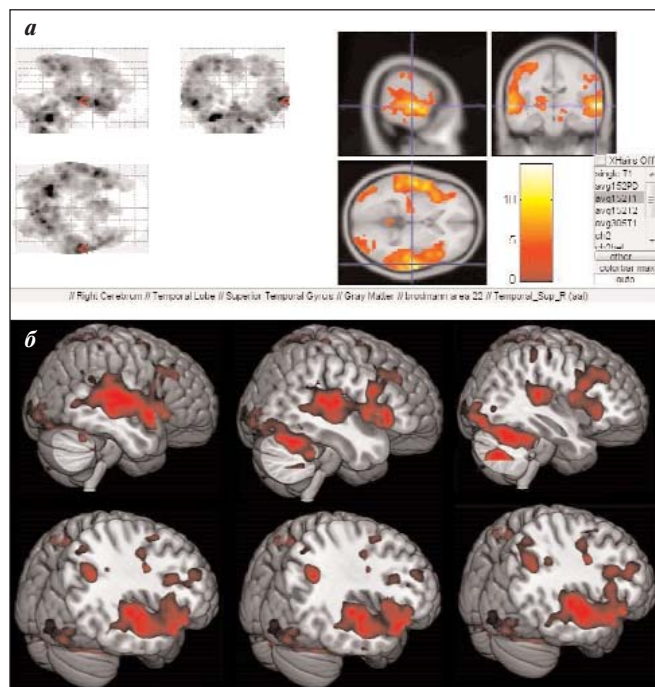


Рис. 1. Активация гомолога зоны Вернике в правом полушарии головного мозга при выполнении первой парадигмы, направленной на определение интонационной характеристики предложения (а) и 3D-изображения латеральной поверхности головного мозга (б)

песен, а музыка одной из них звучала в наушниках в качестве звукового стимула. Все мелодии были выбраны из советских кинофильмов, учитывая особенности целевой аудитории (мужчины и женщины от 27 до 65 лет). Для усложнения решения каждого задания с помощью профессиональных музыкантов были подобраны связки из трех звуковых дорожек, схожих по звучанию и ритму.

MPT-данные были получены на МР-томографе с напряженностью магнитного поля 1,5 Т (Magnetom Avanto, Siemens, Erlangen, Германия). С целью исключения патологических изменений вещества головного мозга исследование начинали со стандартного T2-режима турбо спин-эхо в аксиальной проекции. Для получения анатомических данных применяли 3D-T1-режим градиентное эхо (T1-mpr), который позволяет получить ряд из 176 сагиттальных срезов, охватывающих весь объем вещества мозга: время повторения (TR) – 1940 мс, время эхо (TE) – 3,1 мс, угол наклона – 15°, матрица – 256×256 мм, толщина среза – 1,0 мм, размер вокселя – 1×1×1 мм. Затем для каждой из парадигм было получено по четыре набора функциональных данных в T2*-режиме градиентное эхо в аксиальной проекции: время повторения (TR) – 3750 мс, время эхо (TE) – 47 мс, угол наклона – 90°, матрица – 64×64 мм, толщина среза – 3,0 мм, размер вокселя – 3×3×3 мм. Каждый T2*-режим включал 64 измерения всего объема вещества мозга.

Для оценки полученных данных использовали пакет программ для статистической обработки SPM5 (Wellcome Trust Centre of Neuroimaging, London, UK). Все объемы функциональных данных выравнивали относительно первого для коррекции движения испытуемого. Далее средний

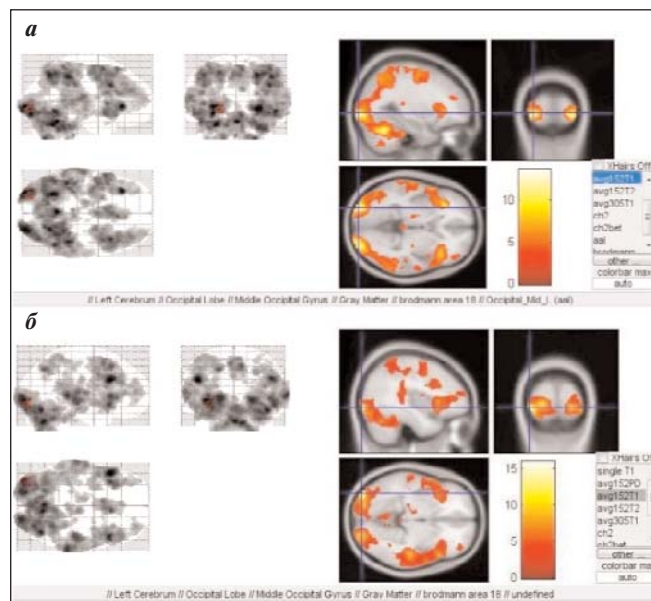


Рис. 2. Преимущественно левосторонняя активация поля Бродмана 18 при выполнении второй (а) и третьей (б) парадигм

функциональный файл линейно корегистрировали с соответствующим анатомическим файлом с последующей пространственной нормализацией первого (3×3×3 мм) и второго (1×1×1 мм) файлов относительно стандартного пространства координат Монреальского неврологического института (Montreal Neurological Institute, MNI).

Пред статистическим анализом «размывали» преобразованные функциональные данные путем применения гауссовой функции с размером ядра 10×10×10 мм для увеличения соотношения сигнал – шум (за счет ослабления высокочастотного шума) и компенсации вариативности строения извилин между субъектами. Статистические параметрические карты генерировали на основании повоксельного сравнения с помощью общей линейной модели [10]. Для минимизации артефактов от движения каждого испытуемого при статистической обработке первого уровня в качестве регрессоров при выравнивании вводили параметры ригидной трансформации. При групповом анализе использовали модель со случайными уровнями факторов с установленным порогом статистической значимости $p < 0,005$ (без коррекции) для выявления значимых зон активации.

Результаты. Установлены зоны активации для каждой из трех парадигм (см. таблицу). При выполнении первой парадигмы, направленной на идентификацию интонационных характеристик речи, наблюдалась двусторонняя активация речевой зоны Вернике (поле Бродмана 22), значительно преобладающая по объему и интенсивности в правом полушарии головного мозга (рис. 1, а, б)¹.

При выполнении второй и третьей парадигм (определение ритма и узнавание мелодии) выявлены двусторонние зоны активации зрительной коры, более выраженные по латерализации справа (латеральная затылочно-височная область); слева – поле Бродмана 18 (что и должно быть в норме у правшей) – ядерная зона зрительного анализатора, центр восприятия письменной речи, вторичная зона (пер-

¹Цветные рисунки к данной статье представлены на сайте журнала: nnp.ima-press.net

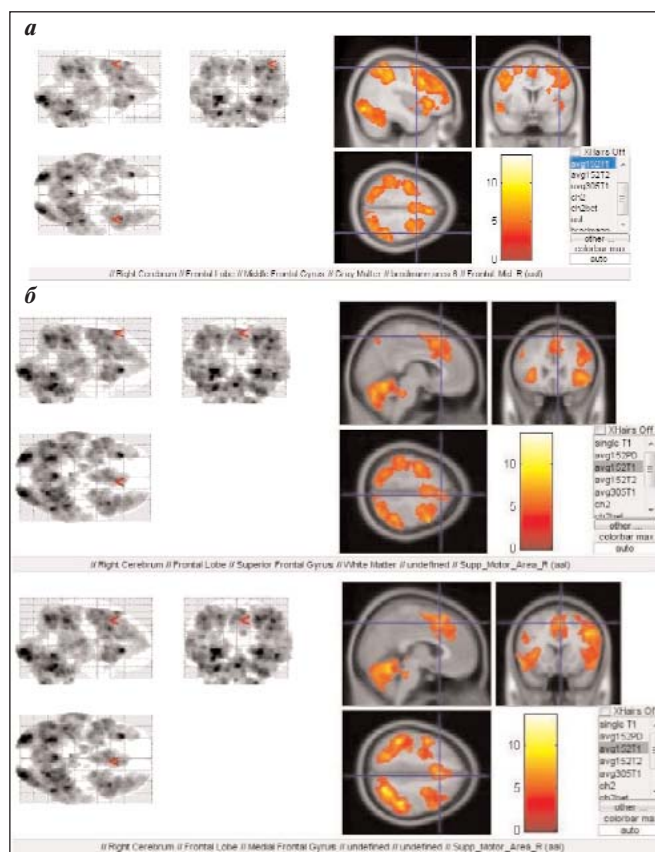


Рис. 3. Активация поля Бродмана 6 в правом полушарии головного мозга (а) и дополнительной моторной области (б) при выполнении второй парадигмы

вичная ядерная зона — поле 17). Примечательно, что во время выполнения заданий второй парадигмы, в которой ритм был представлен символическими обозначениями, и третьей — узнавание мелодии — значительно интенсивнее активировалась затылочная кора левого полушария (рис. 2, а, б). В первой парадигме были равномерно задействованы обе составляющие — как визуально-пространственная, так и символическая. Также, преимущественно в правом полушарии, отмечена активация дополнительной моторной области, включенной в цитоархитектоническое поле Бродмана 6 (рис. 3, а, б).

При определении ритма в правом полушарии достоверно активировалось поле Бродмана 9 (рис. 4).

Отмечена преимущественно левосторонняя активация поля 7 Бродмана — вероятнее всего, проекция рецепторов верхней конечности для узнавания предметов на ощупь. Это легко объясняется тем, что испытуемые удерживали клавиатуру для выбора ответа, не фиксируя ее взглядом. Еще один центр первой сигнальной системы, активируемый во время проведения третьей парадигмы (узнавание мелодии), — это двигательный анализатор сочетанного поворота головы и глаз (поле Бродмана 46), принимающий импульсы от поля 17, имеющего представительство в коре сетчатки глаза (рис. 5).

Все три парадигмы были направлены на исследование речевой просодии, т. е. нелингвистических компонентов речи: интонации, темпа, высоты и громкости тона, эмоциональной окраски. Полученные нами результаты достоверно

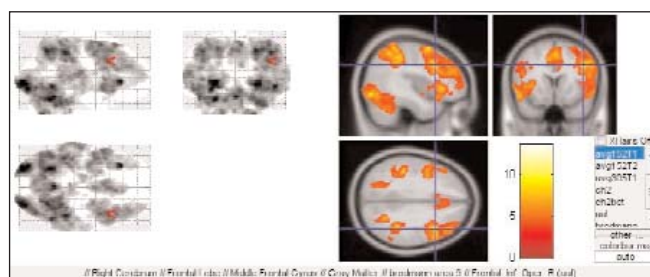


Рис. 4. Правосторонняя активация третичной области дорсолоатеральной префронтальной коры (поле Бродмана 9) при выполнении второй парадигмы

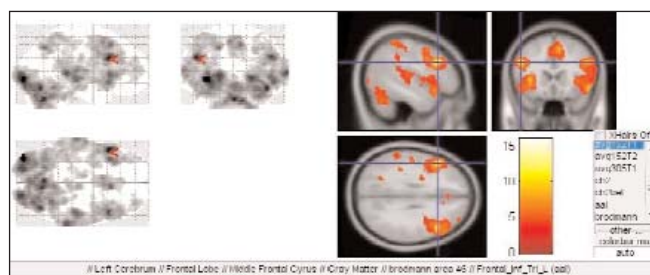


Рис. 5. Активация поля Бродмана 46 во время узнавания мелодии

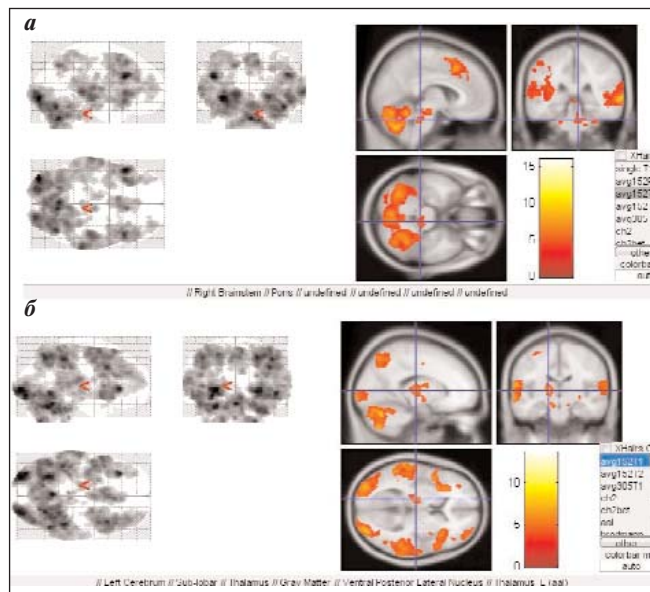


Рис. 6. Активация стволовых структур (а) и таламуса (б)

указывают на ее связь во всех исследованиях на разных уровнях с лимбической системой, непосредственно привносящей эмоциональную составляющую речи. Отдельную роль при этом играют и глубинные структуры головного мозга, в частности таламус, с наибольшей достоверностью активируемый в двух из трех парадигм — на ритм и на интонацию (рис. 6, а, б). Отмечена достоверная активация островковой доли в левом полушарии головного мозга во время выполнения третьей парадигмы.

Примечательно, что во всех трех парадигмах активировался мозжечок, что может быть предметом отдельного исследования.

Обсуждение. Понимание и осмысление функции того или иного участка головного мозга должно начинаться с анализа его филогенеза [11, 12]. В нашем случае следует упомянуть, что формирование и развитие речевой функции оказывает значимое влияние на преобразование корковой организации головного мозга, что наиболее ярко характеризуется ростом территорий периферических (вторичных) полей и образованием третичных полей ядерных зон. Вследствие обозначения специальных речевых отделов в периферических полях ядерных зон существенно изменяется нейронная организация центральных полей [13].

В процессе идентификации ритма и узнавания мелодии ярче всего активируются лобные отделы коркового представительства. Лобная доля головного мозга включает первичную область — проекционная моторная кора (поле Бродмана 4), вторичную — премоторная кора (поля Бродмана 6, 8) и третичную — префронтальная кора (поля Бродмана 9, 10, 11, 44, 45, 46, 47).

Дифференцировка на отдельные поля в лобных отделах происходит у низших обезьян, значительно более развита у приматов и достигает пика с появлением ряда новых полей у человека. Это можно связать с тем, что эволюционно общение между людьми изначально зародилось с помощью движений тела (комплексная кинетическая речь), ритмичных жестов (ручная кинетическая речь), танца, сопровождавшихся нечленораздельными интонационными звуками. Впоследствии первичная коммуникативная система стала базой для формирования звуковой членораздельной речи. Косвенное подтверждение этих процессов можно найти в онтогенезе развития детской речи [14, 15]. Данные психолингвистики показывают, что в онтогенезе «сначала был осмысленный жест и эмоциональная фонация», а уже потом — «осмысленный звук» [16]. Возможно, активация системы, обеспечивающей максимальную обзорность (поле Бродмана 46) именно на мелодию, связана еще с доречевым периодом общения.

Во время выполнения второй парадигмы нами зарегистрирована достоверная активация ($p < 0,001$), преимущественно в правом полушарии, дополнительной моторной области, что позволяет сделать вывод о прямом участии данной области в ритме речи. Эволюционно дополнительная моторная область возникает у обезьян и является частью лобных долей головного мозга [11].

Также зарегистрирована активация поля Бродмана 9. В функции данной области входит: участие в кратковременной памяти [17], определение автоматических ответов [18], беглость речи [19], слуховое словесное внимание [20], определение пространственных образов [21], подсчет серии слуховых стимулов [22] и, непосредственно в правом полушарии, построение пространственной [23, 24] и рабочей памяти [25–27], счет [28, 29], определение эмоций других людей [30]. Известно, что данное поле участвует в семантической и процептивной обработке запахов [31]. Напомним, что эта третичная область дорсолатеральной префронтальной коры сформирована на поздних этапах филогенеза и имеет наиболее тонкое строение и связи.

При составлении первой парадигмы, направленной на определение интонационной характеристики речевого высказывания, мы также опирались на данные известных исследований с расщепленным мозгом, в которых показано, что правое полушарие способно интерпретировать посло-

вицы [32], чувство юмора [33] и даже «ложь во спасение» или сарказм [34], восприятие метафор [35, 36]. Эти данные подтверждаются и современными исследованиями [37, 38]. Таким образом, повреждение правого полушария, не влияя на основной процесс речи, в первую очередь проявляется в нарушении прагматики, которая характеризуется связью между речью и социальными обстоятельствами, содержащими смысловые коммуникативные связи [39, 40].

Отдельные исследования посвящены изучению вопроса о нарушении дискурсивного мышления у больных с правополушарным поражением [41–43], а также анализу нарушения прагматических характеристик и дискурса, возможным вариантам терапии [44].

Восприятие музыки людьми без музыкального образования — это эмоциональное восприятие сигналов мелодии. Музыканты же слышат мелодию как «речь», состоящую из значимых элементов с собственным смыслом. Эти и другие особенности восприятия речи людьми с музыкальным образованием, такие как взаимосвязь с лингвистической грамотностью, памятью, способностью к восприятию тонких слуховых сигналов с лучшим кодированием пространственной информации и более полным представлением о временных аспектах слуховой информации, отражены в работе А. Shook и соавт. [45]. Эти авторы изучали также способность к изучению азбуки Морзе у музыкантов и людей без музыкального образования.

Хорошо описаны мозговая организация и ее асимметрия у испытуемых в зависимости от возраста, в котором они начали заниматься музыкой [46, 47], количества лет обучения [48] и часов практики [49–51], а также различных комбинаций этих параметров [52–56], кроме того, проводились исследования у музыкантов с абсолютным слухом [57], у детей, обучающихся игре на музыкальном инструменте [58–60]. Подробный анализ этих данных представлен в работе R.J. Ellis и соавт. [61].

Эмоциональную компоненту музыкального переживания обеспечивают структуры головного мозга, объединенные в круг Папеца (часть лимбической системы). Здесь следует упомянуть и о лобных долях коры больших полушарий, их связях с неспецифическими стволовыми структурами, оказывающими на кору, в том числе на речевые области, активирующее и дезактивирующее влияние (см. рис. 6, а). Учет этого обстоятельства, а также обратные связи с исполнительным аппаратом речи привели в свое время к фактическому расширению и углублению понимания организации речи с выделением ее других афферентных и эфферентных форм [13].

Пение представляет собой второй после речи режим акустической коммуникации человека. Этот вопрос тщательно изучен с методологической точки зрения. В литературе, посвященной активации человеческого мозга во время пения, основной акцент сделан на анатомической локализации данной активации с использованием соответствующих методов исследования — фМРТ и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ).

Во время пения активируется ряд корковых, подкорковых, мозжечковых и стволовых областей, а билатеральное участие коры лобной, теменной и височных долей подтверждает его роль в человеческом общении. Наиболее важной является корковая активность пересильвиевой области головного мозга. Данный факт подтверждается тем, что паци-

енты с афазией при поражении соответствующей анатомической зоны речевой функции левого полушария могут пропеть, но не могут сказать одни и те же слова. Греческие исследователи I.N. Mavridis и E.S. Pyrgelis [62] предложили термин «clef de sol activation», отражающий активацию корковых зон вокруг сильвиевой борозды с топографическим распределением по типу скрипичного ключа.

В нашем исследовании во время узнавания мелодии была отмечена достоверная активация островковой доли в левом полушарии головного мозга. Нельзя не упомянуть и об анатомической связи островковой доли с соседними лобной, теменной и височной долями. При исследовании 25 больных фармакорезистентной эпилепсией с имплантированными в островковую долю электродами путем прямой стимуляции А. Afif и соавт. [63] в 8 случаях зарегистрировали речевые нарушения — неспособность говорить или снижение интенсивности голоса.

Вероятно, в данном случае, помимо контроля эмоций и поведенческих реакций, активацию островковой доли можно рассматривать как часть нейрональной системы, связывающую супрамаргинальную извилину и зону Брока и таким образом принимающую участие наряду с премоторной корой в фонетическом планировании речи [64–66].

Иная ситуация наблюдается при прослушивании музыки, в этом случае нейронный механизм остается недостаточно исследованным. Китайские ученые изучали картирование нейрональных изменений у здоровых добровольцев при прослушивании наиболее популярной музыки с помощью методов фМРТ и ПЭТ с 11C-N-methylspiperone (11C-NMSP). Испытуемым предлагали два музыкальных варианта: один в стиле «Gangnam Style», а другой более лиричный и легкий — «A Comme Amour». Было выявлено значительное увеличение BOLD-сигнала билатерально от верхней височной коры, мозжечка слева, скорлупы слева и таламуса справа. При прослушивании «Gangnam Style» по сравнению с лирической мелодией было обнаружено значительное увеличение рецепторов моноаминов в левой верхней височной извилине и левой скорлупе и их уменьшение в верхней затылочной коре с двух сторон. Прослеженная корреляция положительного настроения испытуемых как результат адаптации к песне «Gangnam Style» и левосторонней активации *putamen* может говорить о чувстве удовольствия и эмоционального отклика на данный стиль

музыки [67]. Надо учесть, что китайский язык представлен иероглифами, которые, с одной стороны, являются рисунками, а с другой — символами речи.

Хотя все виды мелодий являются невербальной информацией, исследования Н. Gordon [68] показали, что при восприятии дихотомически предъявленных мелодий, отличающихся только ритмом, у здоровых испытуемых доминирует левое полушарие. Кроме того, левое полушарие отвечает за более точную идентификацию лиц, имеющих особые черты, например очень длинный нос, в то время как правое полушарие участвует в распознавании мелких, не бросающихся в глаза особенностей, которые в конечном счете помогают выносить нетривиальное суждение о сущности [69]. Выдвинутая в 1978 г. Н. Gordon концепция о различиях временной организации обработки информации правым и левым полушарием в дальнейшем нашла подтверждение в работе В. Ротенберга [70].

В целом в зависимости от характера задачи, решаемой субъектом в данный момент, и необходимого для этого функционального уровня переработки информации определяется роль каждого из полушарий головного мозга в анализе и синтезе поступающего материала. Исходя из того, что мозг — единая структура, проблему межполушарной асимметрии не совсем корректно рассматривать с точки зрения доминирования того или иного полушария. В настоящее время становится понятным, что наиболее плодотворно изучение психических функций одного из полушарий только в связи с функцией другого полушария.

Заключение. Представленные данные подтверждают распространенность речевых представлений в обоих полушариях головного мозга, что позволяет говорить о содоминантности полушарий по данной функции. В то же время при анализе просодических компонентов речи нами выявлена преимущественная активация речевых зон в правом полушарии головного мозга. Помимо классических речевых зон, отмечалась активация мозжечка, лимбической системы, подкорковых структур и др., что позволяет рассматривать речевую функцию как целостный мозговой процесс.

Мы полагаем, что полученные данные могут быть использованы для картирования просодических характеристик речи у людей, в том числе и при выборе определенных профессий. Изучение данного вопроса является актуальным для нейропсихологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карлов ВА, Шкловский ВМ, Золвкина ВС. Развитие представлений об организации речевой системы. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2017;(5):4-8. [Karlov VA, Shklovskii VM, Zolovkina VS. The development of ideas about the organization of the speech system. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2017;(5):4-8. (In Russ.)].
2. Grandjean P, Landrigan PJ. Developmental neurotoxicity of industrial chemicals. *Lancet*. 2006 Dec 16;368(9553):2167-78.
3. Vingerhoets G, Berckmoes C, Stroobant N. Cerebral Hemodynamics During Discrimination of Prosodic and Semantic Emotion in Speech Studied by Transcranial Doppler Ultrasonography. *Neuropsychology*. 2003 Jan;17(1):93-9.
4. Filippi M. fMRI techniques and protocols. Humana press; 2009. 25 p.
5. Майорова ЛА, Мартынова ОВ, Федина ОН, Петрушевский АГ. ФМРТ-исследование нарушения постинсультной сенсорной афазией. Журнал высшей нервной деятельности. 2013;(3):328-37. [Maierova LA, Martynova OV, Fedina ON, Petrushevskii AG. An FMRI study of violations of post-stroke sensory aphasia. *Zhurnal vysshei nervnoi deyatel'nosti*. 2013;(3):328-37. (In Russ.)].
6. Кремнева ЕИ, Коновалов РН, Кротенкова МВ и др. Функциональная асимметрия речевых структур у здоровых людей, выявляемая при помощи функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). Сборник материалов конференции «Современные направления исследований функциональной межполушарной асимметрии и пластичности мозга». Москва; 2010. С. 173-7. [Kremneva EI, Kononov RN, Krotenkova MV, et al. Funktsional'naya asimmetriya rechevykh struktur u zdorovykh lyudei, vyavlyayemaya pri pomoshchi funktsional'noi magnitno-rezonansnoi tomografii (fMRT). *Sbornik materialov konferentsii «Sovremennye napravleniya issledovaniy funktsional'noi mezhpolusharnoi asimmetrii i plastichnosti mozga»* [Functional asymmetry of speech structures in healthy individuals, detected with functional magnetic reso-

- nance imaging (fMRI). The collection of materials of conference «Modern directions of research of the functional interhemispheric asymmetry and plasticity of the brain»]. Moscow; 2010. P. 173-7.]
7. Власова РМ. Мозговые механизмы номинативной функции речи: нейропсихологический и нейровизуализационный подход. Дисс. канд. психол. наук. Москва; 2013. 144 с. [Vlasova RM. Brain mechanisms of nominative function of speech: neuropsychological and neuroimaging approach. Diss. cand. psychol. sci. Moscow; 2013. 144 p.]
8. Стрельников КН. Функциональная асимметрия мозга при восприятии интонационных характеристик речи в норме и при шизофрении. Автореф. дисс. канд. мед. наук. Санкт-Петербург; 2003. 23 с. [Strelnikov KN. Functional brain asymmetry in the perception of intonational characteristics of speech in norm and at schizophrenia. Autoref. diss. cand. med. sci. Saint-Petersburg; 2003. 23 p.]
9. Шабетник ОИ. Особенности нарушения высших психических функций и их восстановление при поражениях правого полушария мозга. Дисс. канд. пед. наук. Москва; 2011. 153 с. [Shabetnik OI. Features of disorders of higher mental functions and their recovery in patients with lesions of the right hemisphere of the brain. Diss. cand. ped. sci. Moscow; 2011. 153 p.]
10. Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ, et al. Statistical parametric maps in functional imaging: A general linear approach. *Human Brain Mapping*. 1995;2(4):189-210. doi: 10.1002/hbm.460020402
11. Сепп ЕК. История развития нервной системы позвоночных. 1949. 424 с. [Sepp EK. *Istoriya razvitiya nervnoi sistemy pozvonochnykh* [The history of the development of the nervous system of vertebrates]. 1949. 424 p.]
12. Карлов ВА. Детская неврология как инструмент познания развивающегося мозга. Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. 2002;(4):5-6. [Karlov VA. Pediatric neurology as a tool for understanding the developing brain. *Zhurnal neurologii i psikiatrii im. S.S. Korsakova*. 2002;(4):5-6. (In Russ.)]
13. Лурия АР. Высшие корковые функции и их нарушение при локальных поражениях мозга. Москва: Просвещение; 1989. 244 с. [Luriya AR. *Vysshie korkovye funktsii i ikh narushenie pri lokal'nykh porazheniyakh mozga* [Higher cortical functions and their impairment in local lesions of the brain]. Moscow: Prosveshchenie; 1989. 244 p.]
14. Лурия АР, Юдович ФЯ. Речь и развитие психических процессов у ребенка. Москва; 1956. [Luriya AR, Yudovich FYa. *Rech' i razvitiye psikhicheskikh protsessov u rebenka* [Speech and development of mental processes in the child]. Moscow; 1956.]
15. Бадалян ЛО. Детская неврология. Москва; 2001. [Badalyan LO. *Detskaya neurologiya* [Pediatric neurology]. Moscow; 2001.]
16. Исенина ЕИ. Психолингвистические закономерности речевого онтогенеза (дословный период). Иваново; 1983. [Isenina EI. *Psikholingvisticheskie zakonomernosti rechevogo ontogeneza (doslovesnyy period)* [Psycholinguistic regularities of speech ontogenesis (prespeech period)]. Ivanovo; 1983.]
17. Babiloni C, Ferretti A, Del Gratta C, et al. Human cortical responses during one-bit delayed-response tasks: an fMRI study. *Brain Res Bull*. 2005 May 15;65(5):383-90.
18. Kübler A, Dixon V, Garavan H. Automaticity and reestablishment of executive control-an fMRI study. *J Cogn Neurosci*. 2006 Aug;18(8):1331-42. doi: 10.1162/jocn.2006.18.8.1331.
19. Abrahams S, Goldstein LH, Simmons A, et al. Functional magnetic resonance imaging of verbal fluency and confrontation naming using compressed image acquisition to permit overt responses. *Hum Brain Mapp*. 2003 Sep;20(1):29-40. doi: 10.1002/hbm.10126
20. Nakai T, Kato C, Matsuo K. An FMRI study to investigate auditory attention: a model of the cocktail party phenomenon. *Magn Reson Med Sci*. 2005;4(2):75-82. doi: 10.2463/mrms.4.7
21. Knauff M, Mulack T, Kassubek J, et al. Spatial imagery in deductive reasoning: a functional MRI study. *Brain Research. Brain Res Cogn Brain Res*. 2002 Apr;13(2):203-12. doi: 10.1016/S0926-6410(01)00116-1
22. Shallice T, Stuss DT, Alexander MP, et al. The multiple dimensions of sustained attention. *Cortex*. 2008 Jul-Aug;44(7):794-805. doi: 10.1016/j.cortex.2007.04.002. Epub 2007 Dec 23.
23. Slotnick SD, Moo LR. Prefrontal cortex hemispheric specialization for categorical and coordinate visual spatial memory. *Neuropsychologia*. 2006;44(9):1560-8. Epub 2006 Mar 3. doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2006.01.018
24. Leung HC, Gore JC, Goldman-Rakic PS. Sustained mnemonic response in the human middle frontal gyrus during on-line storage of spatial memoranda. *J Cogn Neurosci*. 2002 May 15;14(4):659-71. doi: 10.1162/08989290260045882
25. Zhang JX, Leung HC, Johnson MK. Brain activations associated with accessing and evaluating information in working memory: an fMRI study. *Neuroimage*. 2003 Nov;20(3):1531-9. doi: 10.1016/j.neuroimage.2003.07.016
26. Pochon JB, Levy R, Fossati P, et al. The neural system that bridges reward and cognition in humans: an fMRI study. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2002 Apr 16;99(8):5669-74. doi: 10.1073/pnas.082111099
27. Raye CL, Johnson MK, Mitchell KJ, et al. Neuroimaging a single thought: dorsolateral PFC activity associated with refreshing just-activated information. *Neuroimage*. 2002 Feb;15(2):447-53. doi: 10.1006/nimg.2001.0983
28. Xie S, Xiao J, Jiang X. The fMRI study of the calculation tasks in normal aged volunteers. *Beijing Da Xue Xue Bao*. 2003 Jun 18;35(3):311-3.
29. Rickard TC, Romero SG, Basso G, et al. The calculating brain: an fMRI study. *Neuropsychologia*. 2000;38(3):325-35. doi: 10.1016/S0028-3932(99)00068-8
30. Bermppohl F, Pascual-Leone A, Amedi A, et al. Attentional modulation of emotional stimulus processing: an fMRI study using emotional expectancy. *Human Hum Brain Mapp*. 2006 Aug;27(8):662-77. doi: 10.1002/hbm.20209
31. Royet JP, Koenig O, Gregoire MC, et al. Functional anatomy of perceptual and semantic processing for odors. *J Cogn Neurosci*. 1999 Jan;11(1):94-109. doi: 10.1162/089892999563166
32. Benton AL. Differential behavioral effects of frontal lobe disease. *Neuropsychologia*. 1968;6(1):53-60.
33. Wapner W, Hamby S, Gardner H. The role of the right hemisphere in the apprehension of complex linguistic materials. *Brain Lang*. 1981 Sep;14(1):15-33.
34. Stemmer B, Giroux F, Joannette Y. Production and evaluation of requests by right hemisphere brain-damaged individuals. *Brain Lang*. 1994 Jul;47(1):1-31.
35. Winner E, Gardner H. The comprehension of metaphor in brain-damaged patients. *Brain*. 1977 Dec;100(4):717-29.
36. Черниговская ТВ, Деглин ВЛ. Метафорическое и силогическое мышление как проявление функциональной асимметрии мозга. Ученые записки Тартуского Университета. Труды по знаковым системам. 1986;(19):68-84. [Chernigovskaya TV, Deglin VL. Syllogisme and metaphorical thinking as a manifestation of functional asymmetry of the brain. *Uchenye zapiski Tartuskoj Universiteta, Trudy po znakovym sistemam*. 1986;(19):68-84.]
37. Lundgren K, Brownell H, Roy S, Cayer-Meade C. A metaphor comprehension intervention for patients with right hemisphere brain damage: A pilot study. *Brain Lang*. 2006;99(1-2):69-70.
38. Vanhale C, Lemieux S, Joubert S, et al. Processing of speech acts by right hemisphere brain-damaged patients: an ecological approach. *Aphasiology*. 2000;14(11):1127-41.
39. Myers PS. Toward a definition of RHD syndrome. *Aphasiology*. 2001;15:913-8.
40. La Pointe L, Murdoch B, Stierwalt JA. Brain-based communication disorders. San Diego: Plural Publishing; 2010.
41. Chantraine Y, Joannette Y, Ska B. Conversational abilities in patients with right hemisphere damage. *Journal of Neurolinguistics*. 1998;(11):21-32.
42. Glosser G. Discourse patterns in neurologically impaired and aged populations. In: Brownell HH, Joannette Y, editors. Narrative discourse in neurologically impaired and normal aging adults. San Diego: Singular; 1993. P. 191-212.
43. Tompkins CA, Fassbinder W, Lehman Blake M, et al. Inference generation during text comprehension by adults with right hemisphere brain damage: Activation failure versus multiple activation. *J Speech Lang Hear Res*. 2004 Dec;47(6):1380-95.
44. Blake ML. Perspectives on treatment for

- communication deficits associated with right hemisphere brain damage. *Am J Speech Lang Pathol*. 2007 Nov;16(4):331-42.
45. Shook A, Marian V, Bartolotti J, Schroeder SR. Musical experience influences statistical learning of a novel language. *Am J Psychol*. 2013 Spring;126(1):95-104.
46. Amunts K, Schlaug G, Jäncke L, et al. Motor cortex and hand motor skills: structural compliance in the human brain. *Hum Brain Mapp*. 1997;5(3):206-15. doi: 10.1002/(SICI)1097-0193(1997)5:3<206::AID-HBM5>3.0.CO;2-7.
47. Pantev C, Oostenveld R., Engelien A, et al. Increased auditory cortical representation in musicians. *Nature*. 1998 Apr 23;392(6678):811-4.
48. Musacchia G, Sams M, Skoe E, Kraus N. Musicians have enhanced subcortical auditory and audiovisual processing of speech and music. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2007 Oct 2;104(40):15894-8. Epub 2007 Sep 26.
49. Bengtsson S, Nagy Z, Skare S, et al. Extensive piano practicing has regionally specific effects on white matter development. *Nat Neurosci*. 2005 Sep;8(9):1148-50. Epub 2005 Aug 7.
50. Kleber B, Veit R, Birbaumer N, et al. The brain of opera singers: experience-dependent changes in functional activation. *Cereb Cortex*. 2010 May;20(5):1144-52. doi: 10.1093/cercor/bhp177. Epub 2009 Aug 19.
51. Ellis RJ, Norton AC, Overy K, et al. Differentiating maturational and training influences on fMRI activation during music processing. *Neuroimage*. 2012 Apr 15;60(3):1902-12. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.138. Epub 2012 Feb 9.
52. Ohnishi T, Matsuda H, Asada T, et al. Functional anatomy of musical perception in musicians. *Cereb Cortex*. 2001 Aug;11(8):754-60.
53. Sluming V, Barrick T, Howard M, et al. Voxel-based morphometry reveals increased gray matter density in Broca's area in male symphony orchestra musicians. *Neuroimage*. 2002 Nov;17(3):1613-22.
54. Hutchinson S, Lee LH, Gaab N, Schlaug G. Cerebellar volume of musicians. *Cereb Cortex*. 2003 Sep;13(9):943-9.
55. Foster NE, Zatorre RJ. Cortical structure predicts success in performing musical transformation judgments. *Neuroimage*. 2010 Oct 15;53(1):26-36. doi: 10.1016/j.neuroimage.2010.06.042. Epub 2010 Jun 23.
56. Elmer S, Meyer M, Jäncke L. Neurofunctional and behavioral correlates of phonetic and temporal categorization in musically trained. *Cereb Cortex*. 2012 Mar;22(3):650-8. doi: 10.1093/cercor/bhr142. Epub 2011 Jun 16.
57. Keenan JP, Thangaraj V, Halpern AR, Schlaug G. Absolute pitch and planum temporale. *Neuroimage*. 2001 Dec;14(6):1402-8.
58. Norton A, Winner E, Cronin K, et al. Are there pre-existing neural, cognitive, or motoric markers for musical ability? *Brain Cogn*. 2005 Nov;59(2):124-34. Epub 2005 Jul 28.
59. Schlaug G, Norton A, Overy K, Winner E. Effects of music training on the child's brain and cognitive development. *Ann N Y Acad Sci*. 2005 Dec;1060:219-30.
60. Schlaug G, Forgeard M, Zhu L, et al. Training-induced neuroplasticity in young children. *Ann N Y Acad Sci*. 2009 Jul;1169:205-8. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04842.x.
61. Ellis RJ, Norton AC, Overy K, et al. Differentiating maturational and training influences on fMRI activation during music processing. *Neuroimage*. 2012 Apr 15;60(3):1902-12. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.01.138. Epub 2012 Feb 9.
62. Mavridis IN, Pyrgelis ES. Brain Activation During Singing: «Clef de Sol Activation» Is the «Concert» of the Human Brain. *Med Probl Perform Art*. 2016;31(1):45-50.
63. Afif A, Minotti L, Kahane P, Hoffmann D. Anatomofunctional organization of the insular cortex: A study using intracerebral electrical stimulation in epileptic patients. *Epilepsia*. 2010;51(11):2305-2315. doi: 10.1111/j.1528-1167.2010.02755.x.
64. Augustine J. The insular lobe in primates including humans. *Neurol Res*. 1985 Mar;7(1):2-10.
65. Shelley B, Trimble M. The Insular Lobe of Reil—its Anatomico-Functional, Behavioural and Neuropsychiatric Attributes in Humans. *World J Biol Psychiatry*. 2004;5(4):176-200. doi: 10.1080/15622970410029933.
66. Sörös P, Hachinski V. Cardiovascular and neurological causes of sudden death after ischaemic stroke. *Lancet Neurol*. 2012 Feb;11(2):179-88. doi: 10.1016/S1474-4422(11)70291-5.
67. Chen Q, Zhang Y, Hou H, et al. Neural correlates of the popular music phenomenon: evidence from functional MRI and PET imaging. *Eur J Nucl Med Mol Imaging*. 2017 Jun;44(6):1033-1041. doi: 10.1007/s00259-017-3614-7. Epub 2017 Jan 12.
68. Gordon HW. Left hemisphere dominance for rhythmic elements in dichotomically presented melodies. *Cortex*. 1978 Mar;14(1):58-70.
69. Parkin AJ, Williamson P. Cerebral Lateralisation at different stages of facial processing. *Cortex*. 1987 Mar;23(1):99-110.
70. Ротенберг В. Мозг: Стратегия полушарий. Метафора в свете гештальт-подхода. Екатеринбург: ЛИТУР; 2001. 320 с. [Rotenberg V. *Mozg. Strategiya polusharii. Metafora v svete geshtal't-podkhoda* [Brain. Strategy hemispheres. Metaphor in the light of the gestalt approach]. Ekaterinburg: LITUR; 2001. 320 p.]

Поступила 30.05.2017

Декларация о финансовых и других взаимоотношениях

Исследование не имело спонсорской поддержки. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной версии рукописи в печать. Все авторы принимали участие в разработке концепции статьи и написании рукописи. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.