



DOI: 10.24835/1607-0763-2018-5-6-13

Функциональная МРТ покоя головного мозга в предоперационном планировании. Обзор литературы

Смирнов А.С.^{1*}, Шараев М.Г.², Мельникова-Пицхелаури Т.В.¹, Жуков В.Ю.¹, Быканов А.Е.¹, Шарова Е.В.³, Погосбекян Э.Л.¹, Туркин А.М.¹, Фадеева Л.М.¹, Пицхелаури Д.И.¹, Корниенко В.Н.¹, Пронин И.Н.¹

¹ ФГАУ «Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко» Минздрава России, Москва, Россия

² Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

³ Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, Россия

Resting state fMRI in pre-surgical brain mapping. Literature review

Smirnov A.S.^{1*}, Sharaev M.G.², Melnikova-Pitskhelauri T.V.¹, Zhukov V.Ju.¹, Bikanov A.E.¹, Sharova E.V.³, Pogosbekyan E.L.¹, Turkin A.M.¹, Fadeeva L.M.¹, Pitskhelauri D.I.¹, Kornienko V.N.¹, Pronin I.N.¹

¹ Federal State Autonomous Institution "N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery" of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow, Russia

² CDISE, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow, Russia

³ Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

В настоящее время функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) позволяет планировать оперативное вмешательство с учетом топографии функционально значимых зон коры головного мозга и опухоли. Этот метод может дополнить стратегию хирургического лечения значимой клинической информацией. Как правило, для предоперационного планирования используется стимулзависимая фМРТ с двигательными и речевыми парадигмами. Результат исследования во многом зависит от способности пациента выполнять задания парадигм, которые нарушаются при опухолях головного мозга. В попытке преодоления этой проблемы используется метод фМРТ в состоянии покоя (рс-фМРТ, resting-state fMRI) с картированием функционально значимых зон. рс-фМРТ основана на измерении спонтанных колебаний BOLD сигнала (blood oxygen level-dependent), отражающего функциональное строение мозга. В отличие от стимулзависимой фМРТ рс-фМРТ предоставляет более полную информацию о функциональной архитектуре мозга и применяется в условиях, когда результаты стимулзависимой фМРТ могут быть ложноположительными или при отсутствии возможности ее выполнения. В совокупности оба

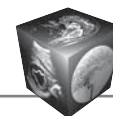
метода существенно расширяют эффективность и специфичность предоперационного планирования.

Ключевые слова: МРТ головного мозга, функциональная МРТ, фМРТ покоя, предоперационное планирование, картирование мозга.

Ссылка для цитирования: Смирнов А.С., Шараев М.Г., Мельникова-Пицхелаури Т.В., Жуков В.Ю., Быканов А.Е., Шарова Е.В., Погосбекян Э.Л., Туркин А.М., Фадеева Л.М., Пицхелаури Д.И., Корниенко В.Н., Пронин И.Н. Функциональная МРТ покоя головного мозга в предоперационном планировании. Обзор литературы. *Медицинская визуализация*. 2018; 22 (5): 6–13.

DOI: 10.24835/1607-0763-2018-5-6-13.

Today, functional magnetic resonance imaging (fMRI) allows to plan surgery based on the topography of functionally important areas of the human brain cortex and tumor. This method can complement the surgical strategy with significant clinical information. The stimulus-dependent fMRI with motor and language paradigms is generally used



for preoperative planning. The study outcome depends on the patient's ability to perform tasks paradigm, which is broken in brain tumors. In an attempt to overcome this problem, resting-state fMRI (rs-fMRI) is used for brain mapping. Rs-fMRI is based on the measurement of spontaneous fluctuations of the BOLD signal (blood oxygen level-dependent), representing the functional structure of the brain. In contrast to stimulus-dependent fMRI, rs-fMRI provides more complete information about functional architecture of the brain. rs-fMRI is used in conditions where the results of stimulus-dependent fMRI may be falsely positive or in the absence of the possibility of its implementation. In aggregate, both methods significantly expand the efficiency and specificity of preoperative planning.

Key words: human brain MRI, functional MRI, resting-state fMRI, presurgical planning, brain mapping.

Recommended citation: Smirnov A.S., Sharaev M.G., Melnikova-Pitskhelauri T.V., Zhukov V.Ju., Bikanov A.E., Sharova E.V., Pogosbekyan E.L., Turkin A.M., Fadeeva L.M., Pitskhelauri D.I., Kornienko V.N., Pronin I.N. Resting state fMRI in pre-surgical brain mapping. Literature review. *Medical Visualization*. 2018; 22 (5): 6–13. DOI: 10.24835/1607-0763-2018-5-6-13.

Введение

В хирургической практике регулярно приходится соблюдать баланс между радикальностью резекции и сохранением функционально значимых корковых зон. Это особенно важно в тех случаях, когда опухоль находится в непосредственной близости от коры и ассоциативных проводящих путей, отвечающих за речь и движение. В этих ситуациях максимальный объем резекции опухоли обычно улучшает клинические исходы в плане выживаемости [1–5]. Однако преимущества расширенной резекции должны быть сопоставлены с вероятностью неврологического дефицита за счет возможного повреждения функционально значимых зон коры, особенно моторных и языковых [5]. Поскольку существует высокая степень индивидуальной анатомической вариабельности этих областей, для достижения наилучшего клинического результата часто требуется комплексная информация в определении предварительной локализации методом функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ) и интраоперационного инвазивного картирования функционально значимых зон.

В подобных клинических случаях фМРТ оказывает вспомогательную роль. Клиническое применение стимулзависимой фМРТ для предоперационного планирования обычно направлено на выявление речевых и двигательных зон активации [6]. Несмотря на преимущества, метод стимулзависимой фМРТ имеет ряд недостатков: результаты напрямую зависят от способности пациента выполнять задание; нельзя использовать седативные

препараты; увеличение времени сканирования для определения нескольких функционально значимых зон.

Альтернативой стимулзависимой фМРТ является рс-фМРТ – метод функциональной оценки состояния мозга, который может быть использован для оценки региональных взаимодействий в состоянии покоя. Изучение функциональных взаимодействий в состоянии покоя позволило выявить ряд нейрональных сетей (НС), постоянно визуализируемых в норме и представляющих особые формы синхронной активности. Благодаря развитию нейровизуализации стали доступны новые методы исследования мозга как сети взаимодействующих областей.

Исследование НС представляет собой новый подход в оценке активности функционально связанных между собой зон, даже если они анатомически отдалены друг от друга. НС могут исследоваться при выполнении активных заданий или же в состоянии покоя. Известно, что в состоянии покоя мозг вовлечен в непрерывную спонтанную активность, которая не связана с какими-либо стимулами или генерацией ответов на них.

Изучение сетей покоя (СП) началось в 80-е годы прошлого века вместе с развитием ЭЭГ [7–9]. Важность СП заключается в том, что их локализация тесно связана с широким спектром сенсорных, моторных и когнитивных процессов [10]. СП сохраняются во время сна [11, 12], при анестезии и общем наркозе [13]. Несмотря на постоянную активность СП, точная их функция до сих пор остается неясной.

Возможно, наиболее значимая – сеть пассивного режима работы мозга (default mode network, DMN), которая была выявлена на основе стимулзависимой позитронно-эмиссионной томографии [14, 15]. Основным определяющим свойством DMN является то, что она более активна в покое, чем при выполнении задач. DMN была впервые выявлена M.D. Greicius и соавт. [16] и далее неоднократно подтверждалась в других исследованиях с использованием различных методов анализа [10, 17–22]. Некоторые исследователи предполагают, что в головном мозге есть две основные взаимно противоположные системы [23, 24]. Одна из них связана с DMN, а другая включает механизмы контроля исполнения и внимания. Эта дихотомия описывается как противопоставление “стимулпозитивной” против “стимулнегативной” [20, 23, 25–27] и “внутренней” против “внешней” [24, 28]. Однако до сих пор значение DMN остается спорным [29, 30].

Базовые сенсорные и моторные СП включают сенсомоторную сеть, выявленную B. Biswal и со-



авт., в которую вовлечены высшие двигательные и сенсорные зоны [31]. Визуальная сеть охватывает большую часть затылочной коры [32–34]. Слуховая сеть состоит из извилины Гешля, верхней височной извилины и задней части островка [10]. Речевая сеть покоя включает зоны Брока и Вернике, а также префронтальную, височную, теменную и субкортикальные зоны коры [32–34].

В состав СП, отвечающих за внимание и контроль исполнения, входят сеть дорсального внимания (СДВ) и вентрального внимания (СВВ) [22, 26, 35–37]. СДВ отвечает за контролирование пространственного внимания, СВВ – за выявление значимых окружающих событий [35, 36, 38]. Фронтотемпоральную сеть связывают с рабочей памятью и контролем целенаправленного поведения [39, 40]. Цингуло-оперкулярная сеть, также известная как салиентная [37] или основная сеть управления [8], позволяет выполнять задачи, требующие контроля исполнения [26, 41].

Общая значимость

Исследование функциональных связей в состоянии покоя имеет значение по двум причинам. Первая – теоретическая: спонтанная активность является весьма метаболически затратным процессом нервной деятельности, потребляющим более 80% энергии мозга. Базовая нейронная активность позволяет поддерживать процессы передачи нервных импульсов, отвечающих за интеграцию данных, как от внутренних органов, так и от внешней среды. По результатам подсчетов дополнительное потребление энергии на выполняемые задания очень мало, как правило, меньше 5%, и что когнитивные функции составляют относительно малую долю энергетического баланса головного мозга. Поэтому при комплексной оценке функций мозга анализ спонтанной активности не менее важен, чем стимулзависимая (stimulus-evoked) активность.

Вторая причина – практическая: исследования состояния покоя не требуют участия пациентов, поэтому они могут быть единственным возможным способом функциональной визуализации для неконтактных пациентов, у которых бывает трудно достичь адекватного уровня исполнения заданий. Неподвижность пациента имеет большое значение, так как артефакты движения и сигнальные компоненты могут сильно ухудшить визуализацию спонтанных компонентов деятельности. Однако фМРТ в состоянии покоя может применяться даже для пациентов, которым с целью иммобилизации выполнена анестезия. Более того, рс-фМРТ не зависит от степени выполнения заданий.

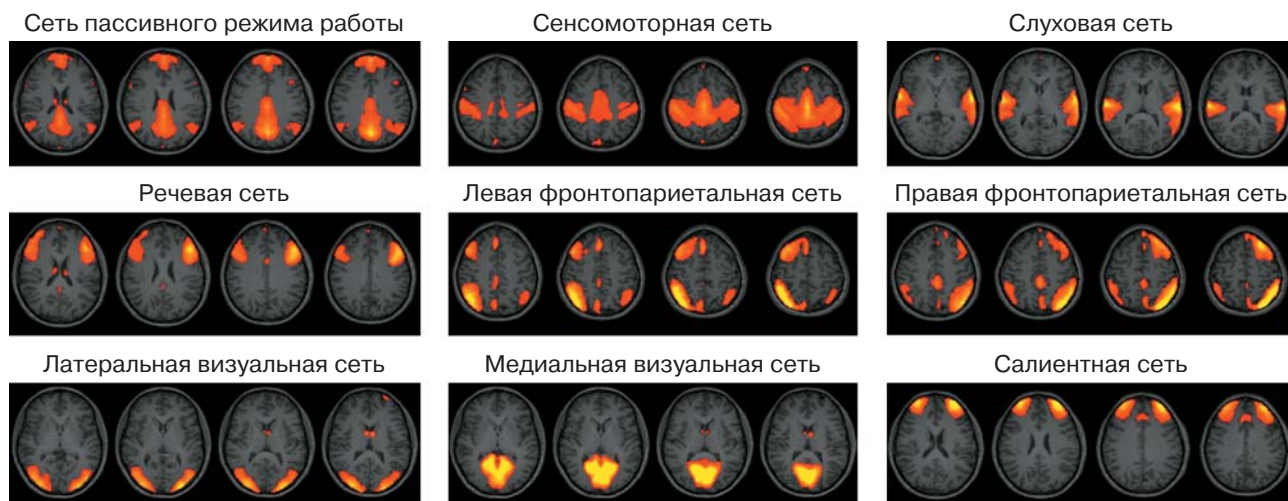
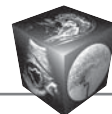
В то время как изучение функциональных связей применялось на здоровых добровольцах для исследования головного мозга, довольно быстро появилось множество потенциальных клинических применений. Исследования продолжаются и в настоящее время. Этот метод имеет большое клиническое значение и особенно полезен для выявления различий между пациентами и группой контроля, а также для сопоставления изменений в состоянии покоя с клиническими проявлениями. Самые достоверные результаты были показаны для таких заболеваний, как болезнь Альцгеймера, рассеянный склероз и боковой амиотрофический склероз, в то время как для других болезней, например шизофрении, результаты оказались более противоречивыми.

Методы обработки

Для обработки полученных данных чаще всего используются два неконтролируемых метода: анализ пространственных независимых компонентов (sICA) и кластерный анализ, а также два требующих контроля метода: выбор точки интереса (ТИ, seed-based) и использование нейронных сетей машинного обучения. Важно отметить, что неконтролируемые методы наиболее востребованы при оценке СП в больших выборках, тогда как в случае оценки одного пациента более информативным методом считается машинное обучение [28, 32]. Таким образом, машинное обучение является ведущим подходом для клинического применения с позиции аналитики.

Применение рс-фМРТ в предоперационном планировании

В настоящее время фМРТ позволяет определить топографию расположения значимых корковых областей и опухолей. Это дает нейрохирургу полезную, но неоднозначную информацию, которая может содействовать хирургической стратегии (например, зоны, которые необходимо сохранить, или области, требующие проведения картирования коры с пробуждением). Наиболее часто предоперационное картирование используют для идентификации областей коры, отвечающих за двигательные и речевые функции. Для проведения стимулзависимой фМРТ требуется, чтобы пациент оставался в сознании, был способен воспринимать информацию и выполнять необходимые парадигмы. В случае с опухолью мозга эффективное участие пациента может быть нарушено из-за неврологического дефицита или снижения уровня сознания. Также ограничено использование анестезии у детей и пациентов, страдающих клаустрофобией, так как пациент



Основные сети состояния покоя, полученные в результате обработки группы здоровых добровольцев.

должен оставаться в сознании. рс-фМРТ не зависит от выполнения задач и проводится вне зависимости от уровня сознания (сон или анестезия). Поэтому ограничения метода рс-фМРТ не существенны, что обещает в ближайшем будущем более широкое его применение.

Предоперационное картирование сетей покоя

D. Zhang и соавт. описали свой первый опыт применения рс-фМРТ в картировании головного мозга для предоперационного планирования пациентов с опухолями головного мозга [42, 43]. Для сопоставления были использованы данные рс-фМРТ ранее обследованных здоровых добровольцев. Также применялись интраоперационная электрокортикальная стимуляция. Полученные данные в совокупности с результатами стимулзависимой фМРТ использовались для сравнения с данными рс-фМРТ. Локализация двигательной активации, полученная при фМРТ и рс-фМРТ, совпала с интраоперационной ЭКС. M. Quigley и соавт. [44] обнаружили совпадение данных стимулзависимой и рс-фМРТ до 40% у пациентов с опухолями, кистами и пороками развития. H. Liu и соавт. [45] отмечают, что при рс-фМРТ картировании двигательных зон руки и языка выявляется та же селективность, что и при стимулзависимой фМРТ и ЭКС.

Результаты применения ТИ в обработке рс-фМРТ аналогичны результатам анализа по независимым компонентам. Рассмотренные выше исследования подтверждают значимость метода рс-фМРТ для картирования функционально значимых сетей у пациентов с опухолями головного мозга.

Неврологический дефицит у пациентов с опухолями головного мозга коррелирует с целостностью моторных сетей покоя. M.L. Otten и соавт. [46] измеряли связанности моторных сетей у пациентов с внутримозговыми опухолями и отметили ее снижение при неврологическом дефиците. Они также выявили, что степень послеоперационного дефицита связана с активностью сетей на дооперационном этапе. Кроме того, клиническое восстановление двигательной функции сопровождалось восстановлением активности соответствующей сети.

T.H. Mitchell и соавт. [47] сообщили о применении картирования СП методом машинного обучения у пациентов с фармакорезистентной формой эпилепсии и опухолями головного мозга. У пациентов с эпилепсией для локализации эпилептогенной зоны начала приступа проводились электрокортикографический мониторинг и картирование коры с помощью ЭКС. У пациентов с опухолями проводилось интраоперационное ЭКС перед резекцией опухоли. Машинное обучение применяли у каждого пациента с опухолями, исключая воксели структуры образования. Интраоперационно двигательные зоны выявлялись посредством произвольных вызванных движений, языковые участки определялись с помощью дефицита речи во время стимуляции. Оценка анатомических границ ложноотрицательных ЭКС результатов при машинном обучении показала, что вероятность их возникновения может быть уменьшена до 2% при помощи расширения зоны “невмешательства” на 15 мм вокруг контура функционально значимой зоны. Применение метода машинного обучения позволило идентифицировать все СП



у пациентов, в том числе с измененной анатомией, за счет масс-эффекта. Отмечается устойчивая связь результатов рс-фМРТ с интраоперационной стимуляцией.

Данные исследования подтверждают значимость метода рс-фМРТ для картирования функционально значимых сетей у пациентов с опухолями головного мозга. Стоит отметить, что необходимы дальнейшие исследования для оценки СП в прогнозировании послеоперационного дефицита.

Дальнейшее развитие

Картирование двигательных и языковых зон с помощью рс-фМРТ может расширить возможности применения предоперационного планирования с идентификацией множества корковых сетей и определением функционально значимых областей мозга. Корреляции между двигательными и речевыми сетями при интраоперационной стимуляции и рс-фМРТ позволяют предполагать, что и другие выявленные нейрональные сети могут быть потенциально значимыми. Другие когнитивные процессы, направленные на внимание, контроль исполнения и сенсорное восприятие, сложны для комплексной оценки на до- и послеоперационном этапах. Хотя хирург и пытается сделать все возможное, чтобы уменьшить неврологический дефицит после операции, эти когнитивные процессы и связанные с ними нейрональные сети также могут иметь значение в долгосрочных перспективах клинических исходов, которые не так просто оценить. Использование автоматизированных методов обработки рс-фМРТ, таких как машинное обучение, позволяет быстро визуализировать все функционально значимые сети за одно сканирование, может стать важным инструментом для оценки не только простых двигательных и речевых задач, но и более сложных когнитивных процессов.

Заключение

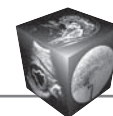
Визуализация нейрональных сетей посредством рс-фМРТ представляет собой новый метод предоперационного планирования. Этот метод позволяет не только визуализировать классические функционально значимые двигательные и речевые зоны, но также может идентифицировать другие важные нейрональные сети. Поскольку данный метод независим от предъявления задач, он выявляет все необходимые сети одновременно, что может фундаментально изменить представление о предоперационной подготовке, существенно расширив возможности обследования пациентов и улучшив визуализацию всех областей головного мозга.

Несмотря на все преимущества, этот метод требует тщательной стандартизации протоколов сбора и анализа данных, а также оценки нормативных значений в качестве эталона. Как следствие необходимы исследования для дальнейшей оценки применимости данного метода, разработка единых стандартов применения и обработки результатов.

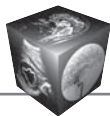
**Статья выполнена при поддержке гранта
РФФИ № 18-29-01032\18**

Список литературы [References]

1. Keles G.E., Chang E.F., Lamborn K.R., Tihan T., Chang C.J., Chang S.M., Berger M.S. Volumetric extent of resection and residual contrast enhancement on initial surgery as predictors of outcome in adult patients with hemispheric anaplastic astrocytoma. *J. Neurosurg.* 2006; 105: 34–40. DOI: 10.3171/jns.2006.105.1.34.
2. Keles G.E., Lamborn K.R., Berger M.S. Low-grade hemispheric gliomas in adults: a critical review of extent of resection as a factor influencing outcome. *J. Neurosurg.* 2001; 95: 735–745. DOI: 10.3171/jns.2001.95.5.0735.
3. Lacroix M., Abi-Said D., Fourney D.R., Gokaslan Z.L., Shi W., DeMonte F., Lang F.F., McCutcheon I.E., Hassenbusch S.J., Holland E., Hess K., Michael C., Miller D., Sawaya R. A multivariate analysis of 416 patients with glioblastoma multiforme: prognosis, extent of resection, and survival. *J. Neurosurg.* 2001; 95: 190–198. DOI: 10.3171/jns.2001.95.2.0190.
4. McGirt M.J., Chaichana K.L., Gathinji M., Attenello F.J., Than K., Olivi A., Weingart J.D., Brem H., Quinones-Hinojosa A.R. Independent association of extent of resection with survival in patients with malignant brain astrocytoma. *J. Neurosurg.* 2009; 110: 156–162. DOI: 10.3171/2008.4.17536.
5. Sanai N., Mirzadeh Z., Berger M.S. Functional outcome after language mapping for glioma resection. *N. Engl. J. Med.* 2008; 358: 18–27. DOI: 10.1056/NEJMoa067819.
6. Matthews P.M., Honey G.D., Bullmore E.T. Applications of fMRI in translational medicine and clinical practice. *Nat. Rev. Neurosci.* 2006; 7: 732–744. DOI: 10.1038/nrn1929.
7. French C.C., Beaumont J.G. A critical review of EEG coherence studies of hemisphere function. *Int. J. Psychophysiol.* 1984; 1: 241–254.
8. Kiviniemi V., Kantola J.H., Jauhiainen J., Hyvärinen A., Tervonen O. Independent component analysis of nondeterministic fMRI signal sources. *Neuroimage.* 2003; 19: 253–260.
9. Locatelli T., Cursi M., Liberati D., Franceschi M., Comi G. EEG coherence in Alzheimer's disease. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 1998; 106: 229–237.
10. Smith S.M., Fox P.T., Miller K.L., Glahn D.C., Fox P.M., Mackay C.E., Filippini N., Watkins K.E., Toro R., Laird A.R., Beckmann C.F. Correspondence of the brain's functional architecture during activation and rest. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2009; 106: 13040–13045. DOI: 10.1073/pnas.0905267106.
11. Larson-Prior L.J., Zempel J.M., Nolan T.S., Prior F.W., Snyder A.Z., Raichle M.E. Cortical network functional connectivity in the descent to sleep. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 2009; 106: 4489–4494. DOI: 10.1073/pnas.0900924106.



12. Samann P.G., Tully C., Spoormaker V.I., Wetter T.C., Holsboer F., Wehrle R., Czisch M. Increased sleep pressure reduces resting state functional connectivity. *MAGMA*. 2010; 23: 375–389. DOI: 10.1007/s10334-010-0213-z.
13. Mhuirheartaigh R.N., Rosenorn-Lanng D., Wise R., Jbabdi S., Rogers R., Tracey I. Cortical and subcortical connectivity changes during decreasing levels of consciousness in humans: a functional magnetic resonance imaging study using propofol. *J. Neurosci.* 2010; 30: 9095–9102. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5516-09.2010.
14. Gusnard D.A., Raichle M.E. Searching for a baseline: functional imaging and the resting human brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 2001; 2: 685–694. DOI: 10.1038/35094500.
15. Shulman G.L., Fiez J.A., Corbetta M., Buckner R.L., Miezin F.M., Raichle M.E., Petersen S.E. Common blood flow changes across visual tasks. II. Decreases in cerebral cortex. *J. Cogn. Neurosci.* 1997; 9: 648–663. DOI: 10.1162/jocn.1997.9.5.648.
16. Greicius M.D., Krasnow B., Reiss A.L., Menon V. Functional connectivity in the resting brain: a network analysis of the default mode hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2003; 100: 253–258. DOI: 10.1073/pnas.0135058100.
17. Beckmann C.F., De Luca M., Devlin J.T., Smith S.M. Investigations into resting-state connectivity using independent component analysis. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 2005; 360: 1001–1013. DOI: 10.1098/rstb.2005.1634.
18. Damoiseaux J.S., Rombouts S.A., Barkhof F., Scheltens P., Stam C.J., Smith S.M., Beckmann C.F. Consistent resting-state networks across healthy subjects. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2006; 103: 13848–13853.
19. De Luca M., Beckmann C.F., De Stefano N., Matthews P.M., Smith S.M. fMRI resting state networks define distinct modes of long-distance interactions in the human brain. *Neuroimage*. 2006; 29: 1359–1367. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2005.08.035.
20. Lee M.H., Hacker C.D., Snyder A.Z., Corbetta M., Zhang D., Leuthardt E.C., Shimony J.S. Clustering of resting state networks. *PLoSOne*. 2012; 7: e40370. DOI: 10.1371/journal.pone.0040370.
21. van den Heuvel M., Mandl R., Hulshoff Pol. H. Normalized cut group clustering of resting-state fMRI data. *PLoSOne*. 2008; 3: e2001. DOI: 10.1371/journal.pone.0002001.
22. Yeo B.T., Krienen F.M., Sepulcre J., Sabuncu M.R., Lashkari D., Hollinshead M., Roffman J.L., Smoller J.W., Zollei L., Polimeni J.R., Fischl B., Liu H., Buckner R.L. The organization of the human cerebral cortex estimated by intrinsic functional connectivity. *J. Neurophysiol.* 2011; 106: 1125–1165. DOI: 10.1152/jn.00338.2011.
23. Fox M.D., Snyder A.Z., Vincent J.L., Corbetta M., Van Essen D.C., Raichle M.E. The human brain is intrinsically organized into dynamic, anticorrelated functional networks. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2005; 102: 9673–9678. DOI: 10.1073/pnas.0504136102.
24. Golland Y., Golland P., Bentin S., Malach R. Data-driven clustering reveals a fundamental subdivision of the human cortex into two global systems. *Neuropsychologia*. 2008; 46: 540–553. DOI: 10.1016/j.neuropsychologia.2007.10.003.
25. Chai X.J., Castanon A.N., Ongur D., Whitfield-Gabrieli S.: Anticorrelations in resting state networks without global signal regression. *Neuroimage*. 2012; 59: 1420–1428. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2011.08.048.
26. Power J.D., Cohen A.L., Nelson S.M., Wig G.S., Barnes K.A., Church J.A., Vogel A.C., Laumann T.O., Miezin F.M., Schlaggar B.L., Petersen S.E. Functional network organization of the human brain. *Neuron*. 2011; 72: 665–678. DOI: 10.1016/j.neuron.2011.09.006.
27. Zhang Z., Liao W., Zuo X.N., Wang Z., Yuan C., Jiao Q., Chen H., Biswal B.B., Lu G., Liu Y. Resting-state brain organization revealed by functional covariance networks. *PLoSOne*. 2011; 6: e28817. DOI: 10.1371/journal.pone.0028817.
28. Doucet G., Naveau M., Petit L., Delcroix N., Zago L., Crivello F., Jobard G., Tzourio-Mazoyer N., Mazoyer B., Mellet E., Joliot M. Brain activity at rest: a multiscale hierarchical functional organization. *J. Neurophysiol.* 2011; 105: 2753–2763. DOI: 10.1152/jn.00895.2010.
29. Jack A.I., Dawson A.J., Begany K.L., Leckie R.L., Barry K.P., Ciccio A.H., Snyder A.Z. fMRI reveals reciprocal inhibition between social and physical cognitive domains. *Neuroimage*. 2012; 66C: 385–401. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2012.10.061.
30. Spreng R.N. The fallacy of a 'task-negative' network. *Front Psychol.* 2012; 3: 145. DOI: 10.3389/fpsyg.2012.00145.
31. Biswal B., Yetkin F.Z., Haughton V.M., Hyde J.S. Functional connectivity in the motor cortex of resting human brain using echo-planar MRI. *Magn. Reson. Med.* 1995; 34: 537–541.
32. Hacker C.D., Laumann T.O., Szrama N.P., Baldassarre A., Snyder A.Z., Leuthardt E.C., Corbetta M. Resting state network estimation in individual subjects. *Neuroimage*. 2013; 82: 616–633. DOI: 10.1016/j.neuroimage.2013.05.108.
33. Lee M.H., Smyser C.D., Shimony J.S. Resting-state fMRI: a review of methods and clinical applications. *Am. J. Neuroradiol.* 2013; 34: 1866–1872. DOI: 10.3174/ajnr.A3263.
34. Tomasi D., Volkow N.D. Resting functional connectivity of language networks: characterization and reproducibility. *Mol. Psychiatry*. 2012; 17: 841–854. DOI: 10.1038/mp.2011.177.
35. Corbetta M., Shulman G.L. Control of goal-directed and stimulus-driven attention in the brain. *Nat. Rev. Neurosci.* 2002; 3: 201–215. DOI: 10.1038/nrn755.
36. Fox M.D., Corbetta M., Snyder A.Z., Vincent J.L., Raichle M.E. Spontaneous neuronal activity distinguishes human dorsal and ventral attention systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2006; 103: 10046–10051. DOI: 10.1073/pnas.0604187103.
37. Seeley W.W., Menon V., Schatzberg A.F., Keller J., Glover G.H., Kenna H., Reiss A.L., Greicius M.D. Dissociable intrinsic connectivity networks for salience processing and executive control. *J. Neurosci.* 2007; 27: 2349–2356. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.5587-06.2007.
38. Astafiev S.V., Shulman G.L., Corbetta M. Visuo-spatial reorienting signals in the human temporo-parietal junction are independent of response selection. *Eur. J. Neurosci.* 2006; 23: 591–596. DOI: 10.1111/j.1460-9568.2005.04573.x.
39. Power J.D., Petersen S.E. Control-related systems in the human brain. *Curr. Opin. Neurobiol.* 2013; 23: 223–228. DOI: 10.1016/j.conb.2012.12.009.
40. Vincent J.L., Kahn I., Snyder A.Z., Raichle M.E., Buckner R.L. Evidence for a frontoparietal control system revealed by intrinsic functional connectivity. *J. Neurophysiol.* 2008; 100: 3328–3342. DOI: 10.1152/jn.90355.2008.



41. Dosenbach N.U., Visscher K.M., Palmer E.D., Miezin F.M., Wenger K.K., Kang H.C., Burgund E.D., Grimes A.L., Schlaggar B.L., Petersen S.E. A core system for the implementation of task sets. *Neuron*. 2006; 50: 799–812. DOI: 10.1016/j.neuron.2006.04.031.
42. Zhang D., Johnston J.M., Fox M.D., Leuthardt E.C., Grubb R.L., Chicoine M.R., Smyth M.D., Snyder A.Z., Raichle M.E., Shimony J.S. Preoperative sensorimotor mapping in brain tumor patients using spontaneous fluctuations in neuronal activity imaged with functional magnetic resonance imaging: initial experience. *Neurosurgery*. 2009; 65: 226–236. DOI: 10.1227/01.NEU.0000350868.95634.CA.
43. Zhang D., Snyder A.Z., Fox M.D., Sansbury M.W., Shimony J.S., Raichle M.E. Intrinsic functional relations between human cerebral cortex and thalamus. *J. Neurophysiol.* 2008; 100: 1740–1748. DOI: 10.1152/jn.90463.2008.
44. Quigley M., Cordes D., Wendt G., Turski P., Moritz C., Haughton V., Meyerand M.E. Effect of focal and nonfocal cerebral lesions on functional connectivity studied with MR imaging. *Am. J. Neuroradiol.* 2001; 22: 294–300.
45. Liu H., Buckner R.L., Talukdar T., Tanaka N., Madsen J.R., Stufflebeam S.M. Task-free presurgical mapping using functional magnetic resonance imaging intrinsic activity. *J. Neurosurg.* 2009; 111: 746–754. DOI: 10.3171/2008.10.JNS08846.
46. Otten M. L., Mikell C.B., Youngerman B.E., Liston C., Sisti M.B., Bruce J.N., Small S.A., Mc-Khann G.M. 2nd. Motor deficits correlate with resting state motor network connectivity in patients with brain tumours. *Brain*. 2012; 135: 1017–1026. DOI: 10.1093/brain/aww041.
47. Mitchell T.H., Hacker C.D., Breshears J.D., Szrama N.P., Sharma M., Bundy D.T., Pahwa M., Corbetta M., Snyder A.Z., Shimony J.S., Leuthardt E.C. A novel data-driven approach to preoperative mapping of functional cortex using resting-state functional magnetic resonance imaging. *Neurosurgery*. 2013; 73: 969–982. DOI: 10.1227/NEU.0000000000000141.

Для корреспонденции*: Смирнов Александр Сергеевич – 125047 Москва, ул. 4-я Тверская-Ямская, д. 16. Отделение рентгеновских и изотопных методов диагностики ФГАУ “Национальный медицинский исследовательский центр нейрохирургии им. акад. Н.Н. Бурденко”. Тел.: +7-926-905-55-61. E-mail: alex.s.smirnof@gmail.com

Смирнов Александр Сергеевич – врач отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Шараев Максим Геннадьевич – канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник Сколковского института науки и технологий, Москва.

Мельникова-Пицхелаури Татьяна Викторовна – канд. биол. наук, ведущий инженер отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Жуков Вадим Юрьевич – канд. мед. наук, врач VII нейрохирургического отделения ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Быканов Андрей Егорович – канд. мед. наук, младший научный сотрудник 7 нейрохирургического отделения ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Шарова Елена Васильевна – доктор биол. наук, заведующая лабораторией общей и клинической нейрофизиологии Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва.

Погосбекян Эдуард Леонидович – мед. физик отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Туркин Александр Мирович – канд. мед. наук, старший научный сотрудник отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Фадеева Людмила Михайловна – ведущий инженер отделения рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Пицхелаури Давид Ильич – доктор мед. наук, заведующий 7 нейрохирургическим отделением ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Корниенко Валерий Николаевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, научный консультант, отделение рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Пронин Игорь Николаевич – академик РАН, доктор мед. наук, профессор, заведующий отделением рентгеновских и радиоизотопных методов диагностики, заместитель директора по науке ФГАУ “НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко” Минздрава России, Москва.

Contact*: Aleksandr S. Smirnov – 125047 Moscow, 4-th Tverskaya-Yamskaya str., 16, Burdenko National Scientific and Practical Center for Neurosurgery, Neuroradiology department. Phone: +7-926-905-55-61. E-mail: alex.s.smirnof@gmail.com

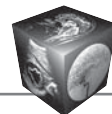
Aleksandr S. Smirnov – med. doctor of Neuroradiology department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Maksim G. Sharaev – cand. of phys-math. sci., researcher of CDISE, Skolkovo Institute of Science and Technology, Moscow.

Tatyana V. Melnikova-Pitskhelauri – cand. of biol. sci., lead. engineer of Neuroradiology department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Vadim Yu. Zhukov – cand. of med. sci., med. doctor of 7 Neurosurgery department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Andrey E. Bikanov – cand. of med. sci., jr. researcher of 7 Neurosurgery department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.



Elena V. Sharova – doct. of biol. sci., Head of the Laboratory of common and clinical neurophysiology at Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology, Moscow.

Eduard L. Pogosbekyan – med. physicist of Neuroradiology department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Alexander M. Turkin – cand. of med. sci., senior researcher of Neuroradiology department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Lyudmila M. Fadeeva – lead. engineer of Neuroradiology department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

David I. Pitskhelauri – doct. of med. sci., Head of 7 Neurosurgery department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Valeriy N. Kornienko – Full Member of the Russian Academy of Sciences, doct. of med. sci., Professor, Consultant, Neuroradiology department of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Igor N. Pronin – Full Member of the Russian Academy of Sciences, doct. of med. sci., Professor, Head of Neuroradiology department, Deputy Director of Federal State Autonomous Institution “N.N. Burdenko National Medical Research Center of Neurosurgery” of the Ministry of Health of the Russian Federation, Moscow.

Поступила в редакцию 04.06.2018.
Принята к печати 02.07.2018.

Received on 04.06.2018.
Accepted for publication on 02.07.2018.