

ИНТЕРАКТИВНЫЙ МОЗГ

Что это такое?

Д. Д. БЕЗМАТЕРНЫХ, О. А. ДЖАФАРОВА, Л. И. КОЗЛОВА, К. Г. МАЖИРИНА, М. Е. МЕЛЬНИКОВ, Е. Д. ПЕТРОВСКИЙ,
М. А. ПОКРОВСКИЙ, В. С. РУДНЕВ, А. А. САВЕЛОВ, Г. М. ЦИРКИН, М. Б. ШТАРК, О. С. ШУБИНА

Как работает наш мозг? Возможно ли сегодня с помощью современных нейротехнологий приблизиться к пониманию природы целого ряда широко распространенных и социально значимых заболеваний нервной системы? Новосибирские специалисты одними из первых в нейробиологической проблематике создали и стали успешно применять на практике технологическую платформу, которая позволила с высокой точностью исследовать активность мозга во время тренинга саморегуляции. Такой подход оказался перспективным не только для изучения механизмов реабилитации больных с наркотической зависимостью, депрессией и инсультом, но и для получения новых знаний о законах работы крупных сетей головного мозга, сформировавшихся в результате «интерактивной» терапии – нового типа восстановительной неврологии

Как появилась идея «интерактивного мозга» и что подразумевается под этим определением? Речь идет о том, что любого человека можно обучить управлять волевым образом обменом веществ своего головного мозга, в первую очередь снабжением кислородом конкретных и достаточно точно локализованных работающих и «молчащих» мозговых участков.

Для неинвазивного мониторинга мозговой активности специалисты Международного томографического центра и НИИ молекулярной биологии и биофизики СО РАН

(Новосибирск) сконструировали «тримодальную» платформу на основе функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), электроэнцефалографии (ЭЭГ) и нейробиоуправления, не привязанного к конкретному способу измерения мозговых сигналов. Эта работа шла параллельно с аналогичными исследованиями зарубежных коллег, которые ссылаются на наши результаты в этом направлении (Zotev *et al.*, 2014; Mano *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2020).

Система состоит из томографа, внутри которого находится магнитно-устойчивый электроэнцефалограф, а также методических и программных решений для проведения тренинга нейробиоуправления, основанного на адаптивной (приспособительной) обратной связи. Томограф, визуализируя работающий мозг в режиме реального времени, превращается в своего рода «эхолот», регистрирующий действующие ансамбли нейронов и не требующий «физического» проникновения в толщу мозга человека.

С созданием системы родились термины, подразумевающие новый функционал: *интерактивная нейробиология* и *интерактивная терапия*

на стр. 148

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Сотрудники лаборатории компьютерных систем биоуправления НИИ молекулярной биологии и биофизики ФИЦ фундаментальной и трансляционной медицины (Новосибирск): научный сотрудник Дмитрий Дмитриевич БЕЗМАТЕРНЫХ; руководитель, канд. физ.-мат. наук Ольга Андреевна ДЖАФАРОВА; научный сотрудник Людмила Игоревна КОЗЛОВА; канд. психол. наук, старший научный сотрудник Ксения Геннадьевна МАЖИРИНА; канд. биол. наук, ведущий научный сотрудник Михаил Евгеньевич МЕЛЬНИКОВ; канд. физ.-мат. наук Виталий Сергеевич РУДНЕВ; невролог высшей квалификации Георгий Максимович ЦИРКИН; академик РАН, д-р биол. наук, главный научный сотрудник Марк Борисович ШТАРК; канд. мед. наук, ведущий научный сотрудник Ольга Сергеевна ШУБИНА. Сотрудники лаборатории МРТ-технологии Международного томографического центра СО РАН (Новосибирск): младший научный сотрудник Евгений Дмитриевич ПЕТРОВСКИЙ; инженер Михаил Александрович ПОКРОВСКИЙ; канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Андрей Александрович САВЕЛОВ

Ключевые слова: интерактивная нейробиология, интерактивная стимуляция мозга, нейробиоуправление, фМРТ, ЭЭГ, адаптивная обратная связь, аддикции (зависимости), инсульт, депрессия.

Keyword: interactive neurobiology, interactive brain stimulation, neurofeedback, fMRI, EEG, adaptive feedback, addiction, stroke, depression

© Д. Д. Безматерных, О. А. Джафарова, Л. И. Козлова, К. Г. Мажирин, М. Е. Мельников, Е. Д. Петровский, М. А. Покровский, В. С. Руднев, А. А. Савелов, Г. М. Циркин, М. Б. Штарк, О. С. Шубина, 2023



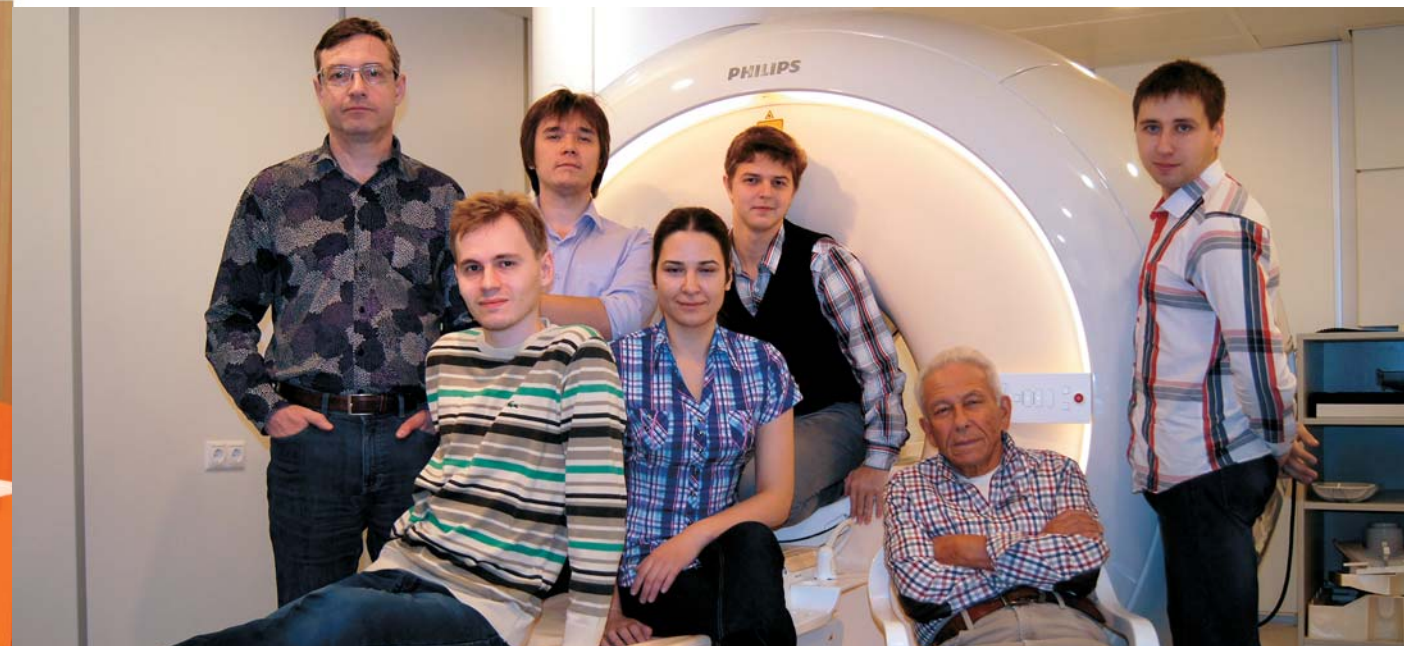
Запись электроэнцефалограммы – процедура, часто используемая в рутинной неврологической диагностике. С помощью этого метода регистрируются электрические сигналы нейронов. Запись идет с поверхности кожи головы, поэтому метод не позволяет судить о точной локализации сигналов

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ «КИТЫ»

Электроэнцефалография (ЭЭГ) – это классический метод исследования мозга, часто используемый для неврологической диагностики. Его суть состоит в регистрации активности нейронов человека в виде электрических сигналов. При подведении электрода непосредственно к нейрону точность метода становится крайне высокой, однако подобные инвазивные исследования на людях проводятся редко. Обычная запись ЭЭГ с поверхности кожи головы представляет собой сумму сигналов огромного количества нейронов, искаженную за счет сопротивления спинномозговой жидкости, оболочек мозга, костей черепа, мышц и кожи головы. В этом случае о точной локализации активности мозга говорить не приходится. Однако, поскольку сигнал записывается с частотой в несколько сотен герц, вся динамика синхронизации и распада нейронных ансамблей сохраняется. Именно эта картина известна нам как ритмы ЭЭГ, которые отличаются по своему происхождению и психофизиологическому смыслу.

Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) позволяет с высокой точностью локализовать области повышенного потребления кислорода нейронами, что служит оценкой активности головного мозга. Эта технология основана на различии в магнитных свойствах разных

форм *гемоглобина* – белка-переносчика кислорода: сила сигнала зависит от интенсивности кровотока, который приносит к клеткам насыщенный кислородом *оксигемоглобин* и вымывает восстановленный *дезоксигемоглобин*, чувствительный к изменению магнитного поля в томографе. С помощью этой неинвазивной, безопасной технологии появилась возможность локализовать активность, возникающую в любой точке головного мозга человека, с точностью до миллиметра и относительно быстро: получение одного «кадра» занимает примерно 1–4 с. фМРТ-исследования наглядно продемонстрировали существование в мозге распределенных действующих нейросетей, включающих различные структуры, активность которых изменяется синхронно. При этом каждое такое мозговое образование отвечает за определенные довольно сложные психические функции: чувствительность, внимание, движение, речь, эмоции, планирование деятельности, общение, самосознание и т. п., – за все проявления разумной деятельности, «переписанные» в динамический архив. Одновременная регистрация двух сигналов – ЭЭГ и фМРТ – позволяет оценивать активность конкретной нейронной сети и практически непрерывно следить за ее изменениями

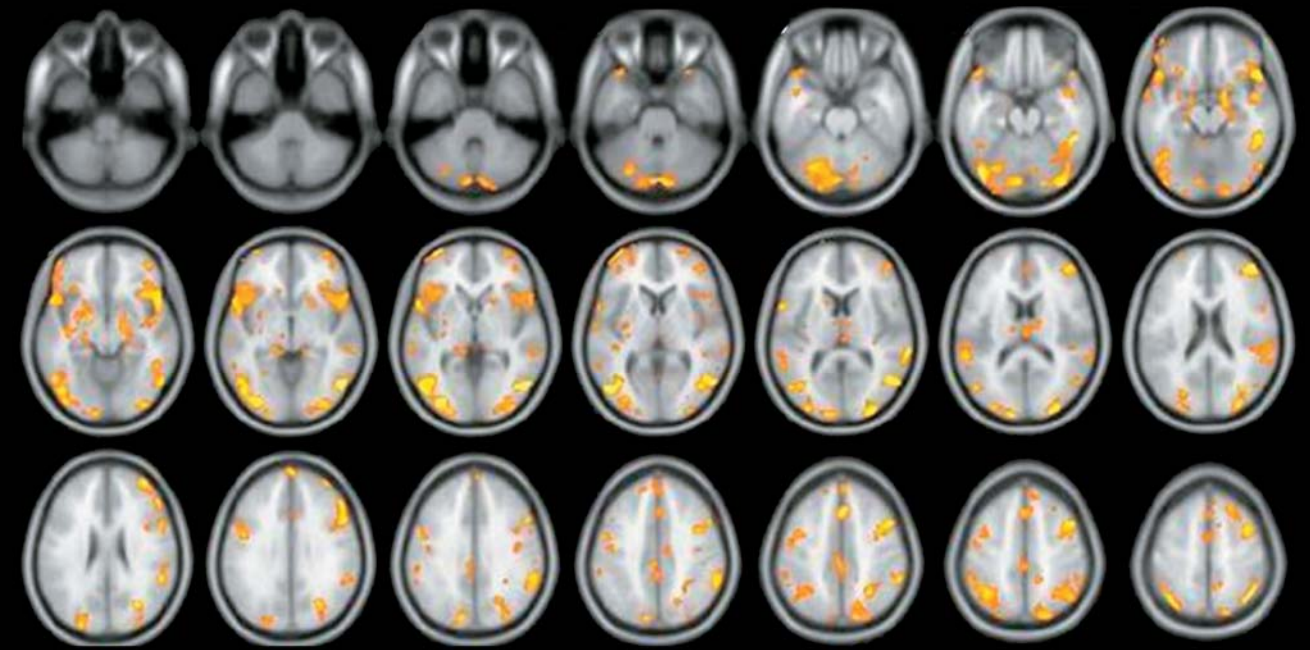


Члены команды академика М. Б. Штарка около 3Т-томографа: слева направо – А. А. Савелов, М. Е. Мельников, Е. Д. Петровский, Л. И. Козлова, Д. Д. Безматерных, М. Б. Штарк, М. А. Покровский

Нейробиоуправление – новая когнитивная технология, позволяющая усилить контроль человека над активностью его собственного мозга для исследовательских и клинических целей. С ее помощью можно преобразовать работу мозга, сделать его «интерактивным». Это позволяет воздействовать на врожденные механизмы саморегуляции физиологических функций и определенных форм психической активности, локализованных в конкретных мозговых структурах, и таким образом инициировать ряд физиологических, психологических и поведенческих феноменов



Один из первых игровых сюжетов для биоуправления, основанный на контроле частоты сердечных сокращений, – спуск водолазов по тросу на морское дно. Слева – экран, видимый участнику, на котором происходит игровое действие. Один из водолазов спускается быстрее, так как этому игроку удается существенно снизить свой пульс. Справа – области головного мозга, которые активируются на промежуточном этапе тренировочного курса, по данным фМРТ. По: (Shtark et al., 2014)



(стимуляция) – немедикаментозное лечение мозговых нарушений, суть которого состоит в формировании навыков волевого управления физиологическими функциями, обычно неподконтрольными нашему сознанию.

Как все происходит на практике? Нужный вид активности мозга оценивается в численных показателях, которые демонстрируются испытуемому или пациенту, помещенному в томограф, практически в режиме реального времени. Человек начинает пробовать различные ментальные стратегии: концентрацию внимания, воспоминания разного свойства, игру воображения, манипулирование собственными эмоциями и т. п., чтобы добиться изменения значения визуализированного сигнала в «нужном» направлении. Обычно методом проб и ошибок он нащупывает сначала общее направление, а затем, оттачивая приобретаемый в процессе нейробиоуправления навык, добивается более уверенного контроля сигнала. Совершенствование приспособительных навыков становится главным мотивом всего лечебно-восстановительного процесса.

В зависимости от сложности задачи «правильное» решение может быть универсальным для большинства людей либо совершенно уникальным. Результаты наших и зарубежных исследований подтверждают, что подобное «самосовершенствование» можно с успехом использовать для реабилитации и лечения широкого спектра психоневрологических заболеваний: от никотиновой и алкогольной зависимостей и депрессий до эпилепсии, болезни Паркинсона, а также отдаленных последствий инфаркта мозга (инсульта).

Об истории формирования этого нового поколения нейротерапии мы уже рассказывали на страницах журнала «НАУКА из первых рук» (2013, 2014, 2016 гг.). Ниже мы подробнее остановимся на результатах и перспективах развития нескольких в разной степени успешных проектов.

Соревнования в томографе

В начале исследований у нас еще не было магнито-защищенного энцефалографа, однако это не помешало изучить формирование навыка саморегуляции при помощи *технологии игрового биоуправления*, основанной на контроле сердечного ритма.

Смысл игры в моделировании ситуации, в которой человек должен оставаться спокойным и хладнокровным, несмотря на азарт, – таким способом можно обучиться мастерству управления своими эмоциями в различных условиях. При этом адаптивная обратная связь позволяет не только «проиграть» возможные варианты поведения, но и оценить степень их эффективности. Биоуправление по пульсу хорошо известно в практике стресс-менеджмента: оно позволяет человеку расслабиться и нормализовать свои физиологические характеристики.

Мы предлагали испытуемым, находившимся в МР-томографе, компьютерную игру, в которой водолазы спускались по тросу на дно моря. Выигрывал тот, кто приходил к финишу первым. Скорость спуска определялась пульсом игрока: чем он реже, тем быстрее

водолаз достигал цели. В каждом следующем раунде скорость игрока, достигнутую на предыдущем этапе соревнования, «наследовал» его соперник. Поэтому для достижения нескольких побед подряд участнику требовалось последовательно улучшать свои результаты в ходе тренировочного дня. Однако для некоторых игроков (контрольная группа) результаты были predeterminedены заранее: скорость движения их «водолазов» не зависела от ЧСС.

Эти исследования показали, что на начальных этапах обучения мозговая активность диффузно возрастает, а затем локализуется в конкретных регионах и снижается до оптимального уровня. К концу курса у человека формируется сконструированная им самим функциональная сеть мозга, отвечающая за саморегуляцию в ходе игрового сюжета. Она локализуется в *височно-теменном узле*, ответственном за формирование у индивидуума образа своего тела и манипулирование этим образом.

У участников, получающих ложную обратную связь, наблюдается более широкое, диффузное распределение активности в коре головного мозга. Это указывает на вынужденное использование более разнообразных стратегий, интенсивный и сложный процесс их перебора из-за невозможности найти оптимальный способ, обеспечивающий выигрыш.

Эффекты, сопутствующие деятельности мозга в курсе игрового биоуправления, указывают на то, что формирование навыков саморегуляции физиологических функций сопровождается активацией не только

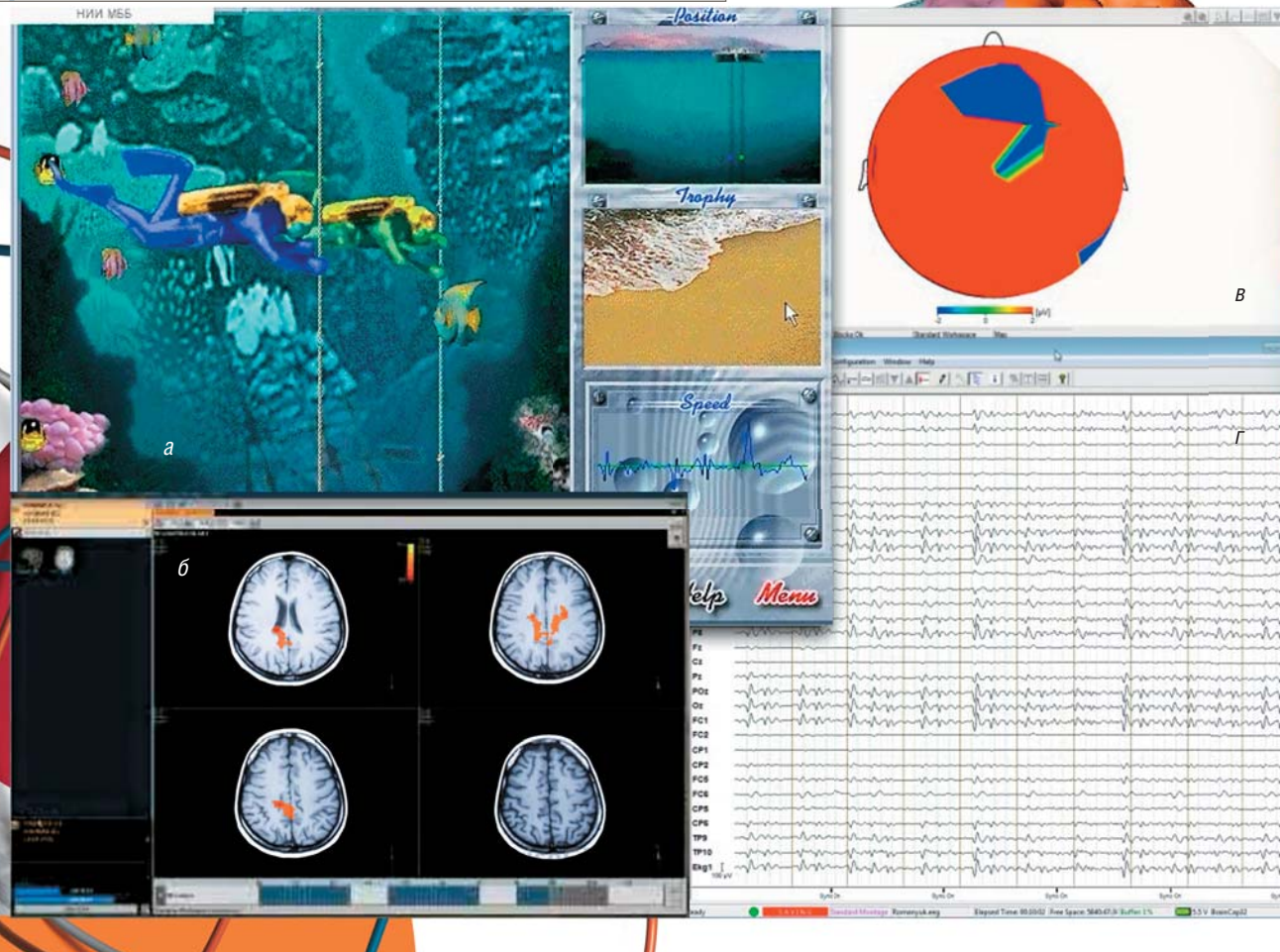
тех областей мозга, которые традиционно связывают с когнитивными действиями, но и центров саморегуляции. Зная местоположение последних, мы можем «прицельно» тренировать и совершенствовать разнообразные психические функции.

Владейте своим альфа-ритмом

Научить человека управлять ритмами электрической активности его собственного мозга; увидеть, как он этого добивается; открыть механизм его успеха – вот задачи, которые мы начали решать в рамках проблемы «интерактивный мозг», когда все три составляющие нашей тримодальной платформы наконец-то сошлись в одном месте в одно время.

Тогда нам впервые удалось наблюдать непосредственно в томографе, как у человека формируются навыки саморегуляции произвольных функций мозга, представленные модификациями *альфа-ритма* ЭЭГ (Shtark, Verevkin, Kozlova et al., 2014; Shtark, Kozlova, Bezmaternykh et al., 2018).

Альфа-ритм – главный ритм электрической активности мозга, который можно рассматривать как маркер спокойного бодрствования. Нейробиоуправление по этому показателю является практически универсальной технологией, которая с некоторыми видоизменениями может применяться для самых разных целей: общей релаксации, улучшения показателей мышления, снижения тревожности и силы хронической боли, снятия абстинентного синдрома.



При использовании тримодальной системы для неинвазивного мониторинга мозговой активности участник исследования может отслеживать на экране монитора ход игры, с помощью которой он приобретает навык биоуправления (а). Кроме того, на экране в режиме реального времени отображается динамика фМРТ-сигнала в конкретных работающих мозговых структурах (б); распределение (карта) ритмов ЭЭГ по поверхности головы (в); суммарная электрическая активность мозга (г)

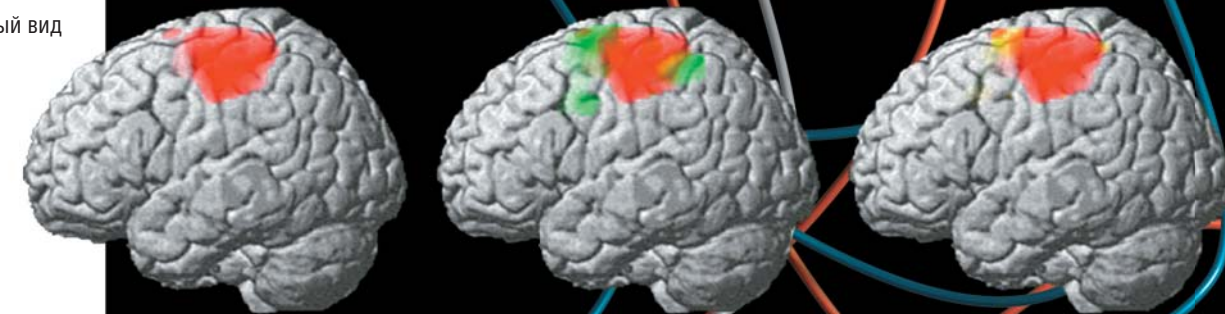
В исследовании участвовали взрослые мужчины, прошедшие курс нейробиоуправления по *альфа*-ритму ЭЭГ, а в контрольной группе испытуемые в качестве «мишени» обратной связи получали данные о *бета*-ритме, обычно сигнализирующем о выраженной мыслительной активности. Тренировочный курс состоял из 20 обычных сессий и трех дополнительных, которые проходили внутри МР-томографа, при этом на всех сеансах участники получали обратную связь об успешности своих попыток.

Предполагалось, что подобный длительный курс может изменить характер взаимодействия глобальных мозговых систем – так называемых *сетей покоя*. Это и произошло в действительности: более синхронно стали работать *сеть обнаружения важных стимулов*, участвующая в обработке эмоционально значимой

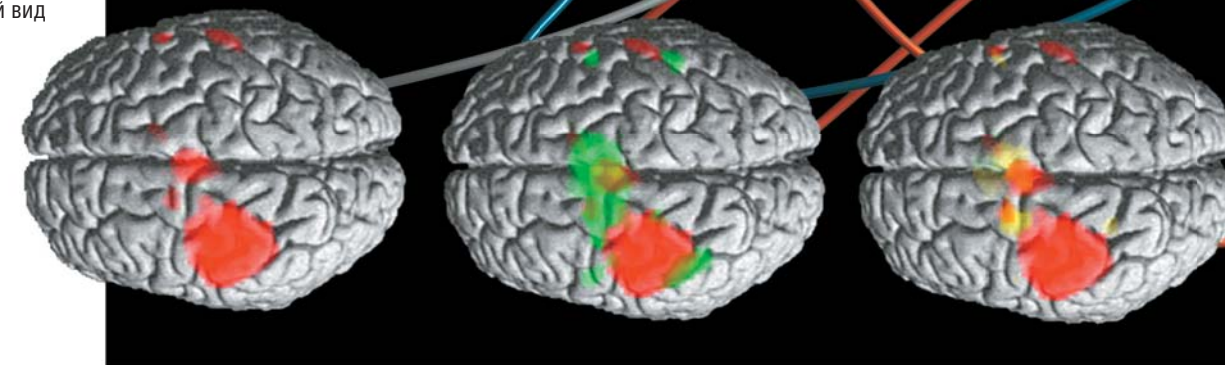
информации, и *сеть предклинья*, связанная с самосознанием и самовосприятием человека. А связи между лево- и правополушарной частями *исполнительной системы* – важнейшего центра принятия решений, контролирующего высокое качество и безошибочность действий, по мере формирования новых ментальных стратегий, напротив, ослабли.

Интересно, что прямую связь между мощностью *альфа*-ритма и фМРТ-активностью мозга удалось выявить только у испытуемых, успешно справившихся с задачей: вероятно, только в этом случае в мозге формировалась сеть, контролирующая произвольную генерацию *альфа*-ритма ЭЭГ. При этом соответствующие локусы активности были обнаружены в лобной области, хотя основная территория *альфа*-ритма расположена в затылочных долях.

Сагиттальный вид



Аксиальный вид



При реальном сжимании кисти в кулак происходит активация корковых моторных областей; аналогичный процесс идет и при попытке воспроизвести подобный ответ мозга усилием воли. В случае правой руки активируются участки в левой первичной моторной коре – целевом регионе (показаны красным цветом). Зеленым цветом отмечены области, активированные при нейробиоуправлении (приемы волевого управления по усмотрению пациента); желтым – области, активированные при попытках саморегуляции с помощью воображения действия. Видно, что в этом случае начинают работать соседние зоны мозга с небольшим перекрытием целевого региона. По: (Мельников и др., 2017)

После инсульта: движение – это жизнь

Ежегодно 16 млн людей на нашей планете поражает инсульт – острое нарушение мозгового кровообращения, причем почти половина из них на всю жизнь остается инвалидами с теми или иными дефектами в умственной и моторной сферах. Все эти люди, как правило, нуждаются в длительном восстановительном лечении, причем его результаты далеко не всегда оказываются успешными.

Нами было принято решение использовать фМРТ-нейробиоуправление для восстановления и развития двигательной функции у постинсультных пациентов. Важно, что в большинстве случаев эти люди перенесли инсульт за несколько лет до начала

предлагаемого нами восстановительного курса интерактивной стимуляции, т. е. с позиции классических реабилитационных догм они считались бесперспективными.

Попытки применить технологию фМРТ-нейробиоуправления для лечения перенесших инсульт людей на сегодня предприняты в двух-трех лабораториях мира (Chiew, 2012; Sitaram *et al.*, 2012; Wu *et al.*, 2020). Так, в работе, где для биоуправления использовался сигнал ЭЭГ, пациентам во время движений пальцами удалось частично ослабить работу пораженного полушария мозга в пользу здорового, что сопровождалось клиническими улучшениями (Young *et al.*, 2014).

Идея перераспределения функций между полушариями (для укрепления связи моторики руки с активностью соответствующего ей полушария) была достаточно успешно реализована в другой работе уже



на здоровых людях, где для биоуправления применялся сигнал фМРТ из первичной моторной коры (Chiew *et al.*, 2012). Однако наши предварительные исследования показали, что даже здоровые люди не всегда могут с помощью умственных усилий, воображая движение, активировать первичный моторный центр. Зато вторичные двигательные и сенсорные области оказались более податливой «мишенью».

Курс нейробиоуправления, который мы предложили пациентам, перенесшим инсульт, состоял из нескольких сессий с использованием воображаемого движения кисти пораженной руки. В результате у части пациентов значительно увеличилась подвижность парализованных конечностей, улучшилось чувство равновесия и координации движений без зрительного контроля, что обеспечило им больше свободы и уверенности в движениях, повысило их работоспособность. Параллельно были обнаружены перестройки функциональных связей различных структур головного мозга – будущих «мишеней» интерактивной терапии, которая может дать вполне ощутимые результаты.

В погоне за депрессией

В отличие от постинсультного состояния, попытка использовать новый протокол нейробиоуправления для лечения сравнительно легких форм депрессии оказалась менее успешной. В этой работе был впервые

использован 3Т-томограф, что обеспечило высокое качество изображения и быстрое получение данных. При небольшом снижении чувствительности удалось достичь скорости 1 фМРТ-кадра в секунду, что принципиально для этого подхода.

В качестве «мишени» волевого биоуправления после ряда предварительных исследований была выбрана *медиальная префронтальная кора* больших полушарий головного мозга. Эта структура, как известно, способна корректировать автоматические эмоциональные реакции, возникающие в *миндалевидном теле*, и таким образом влиять на эмоциональную оценку ситуации.

Пациенты с депрессией в течение восьми сеансов обучались волевым воздействием под визуальным контролем увеличивать или уменьшать активность медиальной префронтальной коры, чтобы осознать «полезный» и «вредный» для них стиль мышления. Всем участникам удалось освоить эту технологию: они научились успешно влиять на данный показатель даже при отсутствии обратной связи, когда были вынуждены полагаться на ранее сформированные стратегии самоконтроля, не зная об их эффективности в каждый текущий момент.

При этом клинические результаты такого протокола уступали результатам пациентов контрольной группы, прошедших краткий курс когнитивно-поведенческой психотерапии. Основная проблема исследований реакций пациентов с депрессиями в процессе терапии

Изучать реакцию мозга на терапию у больных с депрессией мешает высокая изменчивость его активности. Справа отображены функциональные связи между разными областями мозга у таких пациентов, не получавших лечения в течение двух месяцев. Сила «красных» связей за этот период возросла, «синих» – снизилась. Сами области, укрепившие связи с другими регионами, обозначены *красным цветом*, ослабившие – *синим*, с неоднозначной динамикой – *зеленым*. По: (Безматерных и др., 2018)

состоит в том, что активность их мозга отличается высокой изменчивостью. Так, даже при отсутствии лечения сила связей между различными структурами у таких больных значительно изменилась за два месяца наблюдения (Безматерных и др., 2018).

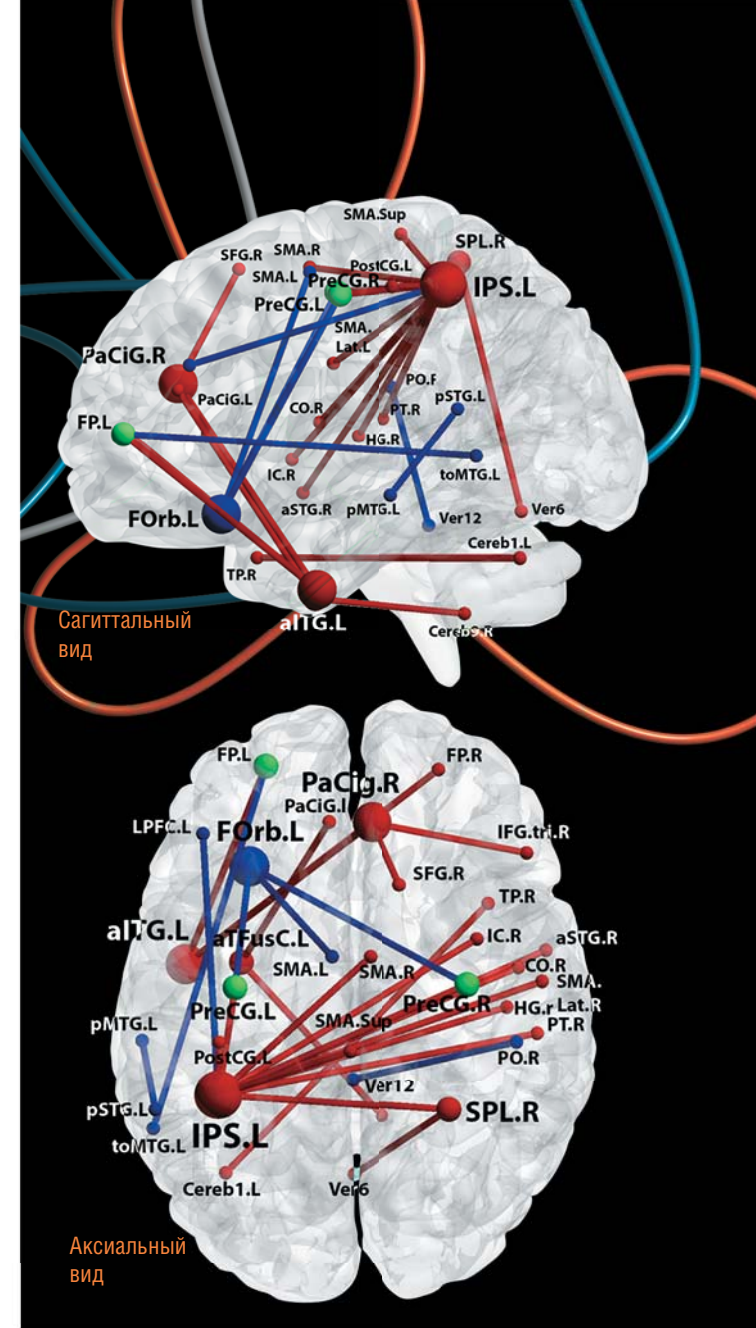
Зависимость и «я»

В работе, которая выполнялась в сотрудничестве с Новосибирским областным наркологическим диспансером, мы руководствовались глубинно-психологической гипотезой, изложенной в работах известного российского психиатра Ц. П. Короленко и его коллег. Согласно этой гипотезе, у лиц с химической зависимостью формируется альтернативное патологическое «я», постепенно вытесняющее здоровое. Нас интересовало, идет ли в ходе реабилитации восстановление функции самосознания и сопровождается ли этот процесс какими-то видимыми изменениями в работе мозга.

К стандартной программе реабилитации больных мы добавили различные (в зависимости от типа аддикции) протоколы ЭЭГ-нейробиоуправления, с помощью которых попытались корректировать нарушенные ритмы ЭЭГ и связанные с ними когнитивные функции.

На момент включения в программу нейробиоуправления пациенты, судя по данным психологических тестов, действительно характеризовались менее зрелым самосознанием. В соответствующем фМРТ-эксперименте, где требовалось соотносить со своей личностью различные прилагательные, они демонстрировали меньшую активность ряда центров мозга, включая гиппокамп, таламус и подкорковые ядра, а структурные карты показывали снижение объема серого вещества (тел нейронов) практически по всему мозгу.

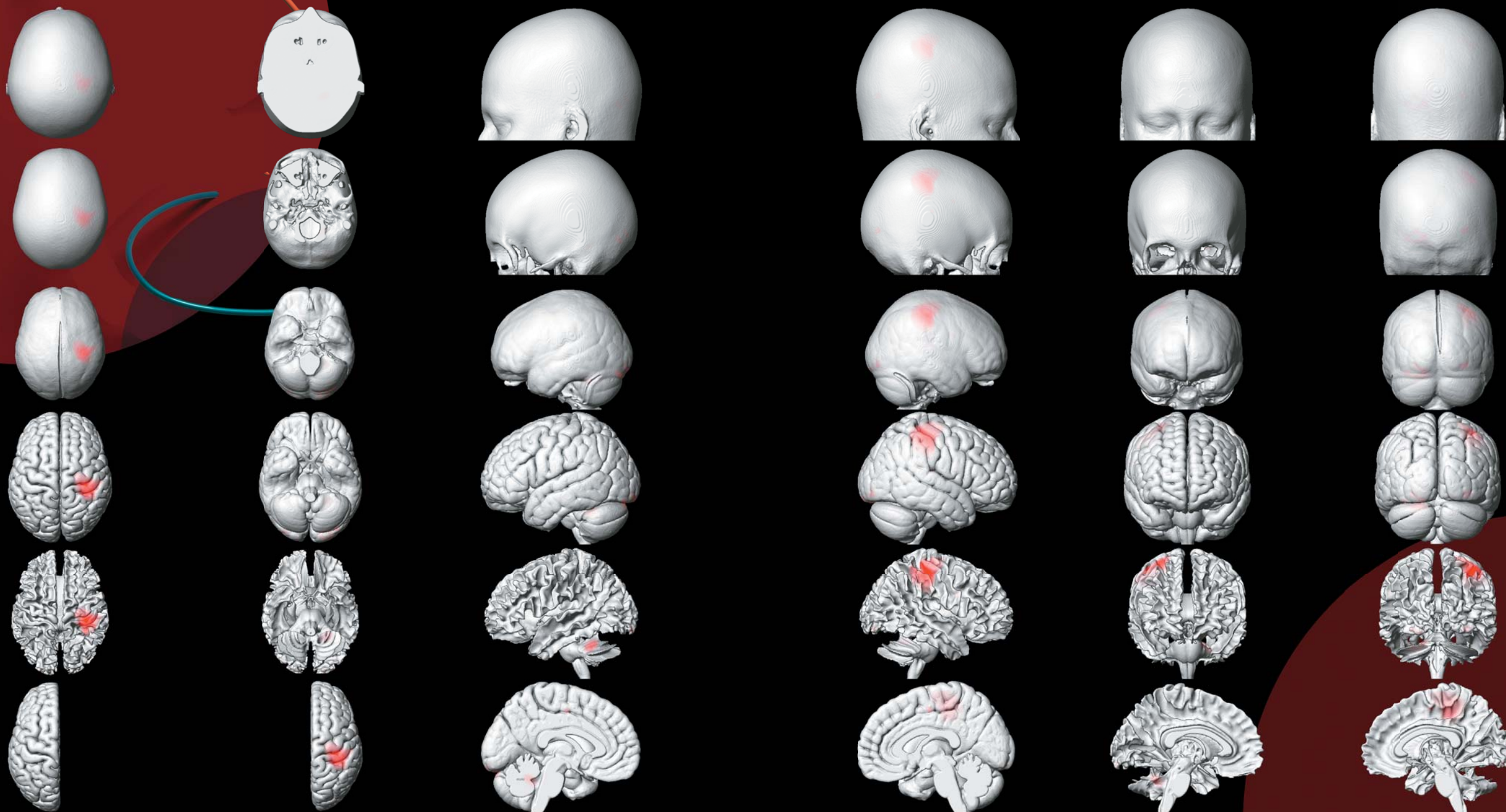
По завершении курса нейробиоуправления пациенты еще раз прошли психологическое тестирование, согласно которому показатели зрелости их «я» пациентов значительно увеличились. Наряду с этим изменился один из стандартных показателей, оцениваемых в нейрофизиологических исследованиях, – уровень падения амплитуды *альфа*-ритма ЭЭГ при открывании глаз (этот компонент электроэнцефалограммы наиболее полно проявляется в состоянии покоя с закрытыми глазами).



Кроме того, возросла активность мозга в эксперименте по оценке собственной личности, о котором шла речь выше. По предварительным данным, максимальное увеличение фМРТ-ответа отмечалось в *колеччатых телах* промежуточного мозга – эти подкорковые образования выполняют передаточные функции по отношению к коре больших полушарий.

Томография без томографа

Практика одновременной записи ЭЭГ и фМРТ подразумевает принципиальную возможность математического выражения одного из этих сигналов через другой. Особенно привлекательным видится предсказание фМРТ-ответа на основе ЭЭГ.

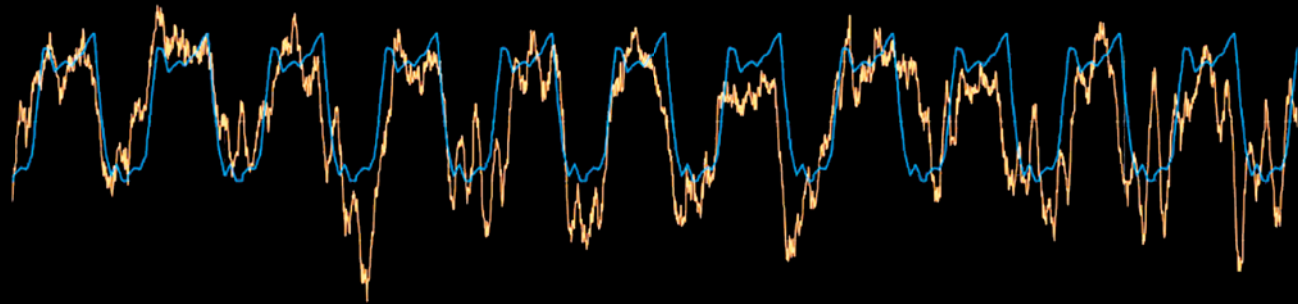


Регрессионные формулы «перевода» ЭЭГ в фМРТ-ответ сенсомоторной коры были составлены на основе собранных новосибирскими специалистами данных моторных проб здоровых людей и пациентов, перенесших инсульт. *Вверху* – изменения в моторной зоне и мозжечке пациента при движении рукой, пораженной парезом, по данным фМРТ. Автор изображений В. С. Руднев

Сложность этой задачи заключается в том, что при снятии ЭЭГ используется ограниченный (в лучшем случае 128–256) набор электродов. На основе этих данных практически невозможно предсказать сложнейшую 3D-карту

фМРТ-сигнала целого мозга, однако вполне реально получить усредненный ответ одной области при выполнении конкретной задачи. Поэтому в случаях, когда не требуется высокая точность, для оценки сигнала от отдельно взятого участка мозга можно использовать «данные фМРТ», полученные без томографа – путем преобразования ЭЭГ.

Одним из таких случаев и является нейробиоуправление. «Томография без томографа» имеет очевидные экономические преимущества и гарантирует развитие и широкое распространение интерактивной терапии мозга, увеличивая доступность процедуры для большого круга пользователей. Кроме того, с помощью этого подхода можно обучить саморегуляции конкретных



Эти графики демонстрируют успешный пример «перевода» данных ЭЭГ в фМРТ. Кривая синего цвета – модельный сигнал фМРТ-ответа, желтого – предсказание этого ответа на основе ЭЭГ, снятой с использованием одного электрода у конкретного постинсультного пациента, который совершает движение больной рукой. Хорошо видна высокая степень совпадения кривых (корреляция $r = 0,69$)

участков мозга даже тех пациентов, которые имеют противопоказания к процедуре МРТ-исследования или испытывают во время нее сильный дискомфорт.

Авторитетный израильский коллектив ранее уже решал подобную задачу преобразования сигналов, получив фМРТ-«отпечаток» активности миндалевидного тела при помощи данных ЭЭГ. Точность реконструкции сигнала фМРТ была затем подтверждена в экспериментах, направленных на профилактику посттравматического стресса у военных (Кеунан *et al.*, 2019).

Для предсказания активности моторных областей мозга мы использовали данные двигательных проб здоровых людей и пациентов, перенесших инсульт. На основе этих данных были составлены регрессионные формулы «перевода» ЭЭГ в фМРТ-ответ первичной моторной коры. В принципе, алгоритмы на основе этих формул позволяют, записав ЭЭГ даже с помощью устройства с одним-двумя активными каналами, симулировать достаточно качественный фМРТ-сигнал двигательной коры, чтобы проводить на его основе сессии нейрореабилитации. В будущем подобные универсальные алгоритмы могут быть включены в состав программного обеспечения серийных энцефалографов и интерфейсов нового поколения нейротерапии.

Наш мозг – удивительный и сложный механизм, возможно, самый сложный из всего, что есть на планете. Сегодня мы достаточно хорошо представляем, как работает отдельная нервная клетка, определены области, отвечающие за те или иные конкретные психические функции. Следующим шагом должно стать освоение и понимание функциональной роли более крупных, системных объектов внутри мозга – сетей, объединяющих разные структуры во всех возможных взаимодействиях между ними

в функциональный *коннектом* – главный механизм когнитивной интеграции. Именно поэтому так важно сочетать различные технологии нейровизуализации, демонстрирующие работу мозга в разных масштабах.

Нейробиоуправление на базе фМРТ основывается на механизме, существующем в нас с рождения, – приспособительной обратной связи. С помощью современной компьютерной технологии как здоровый, так и больной человек может научиться управлять состоянием основных физиологических характеристик нашего главного органа – головного мозга, вовлекая его в интерактивный режим. В определенной степени эта идея реализована в приборах производства новосибирской фирмы «КОМ-СИБ» («Компьютерные системы биоуправления»).

Одна из задач будущего – это создание «клиники интерактивной терапии». В обычной жизни мы привыкли к тому, что при любой форме лечебного или восстановительного вмешательства пациент остается пассивным объектом, полностью отдавая себя в руки врача. И очень важно изменить эту позицию больного, сделать его активным субъектом лечебно-восстановительного процесса. Пора поменять роли в формуле «врач – пациент – врач», используя мозг пациента, который будет уже не «вещью в себе», а интерактивным и доступным для контакта инструментом.

Наш коллектив располагает достаточным опытом, который служит гарантом такого направления развития. Подтверждением этому служит вышедшая в США в 2020 г. энциклопедия *Neurofeedback: The First Fifty Years* («Нейробиоуправление: первые пятьдесят лет»), где новосибирская исследовательская команда представляет Россию в этой перспективной области нейронаук.

В опубликованной в США книге *Neurofeedback: The First Fifty Years* (2020) признанные пионеры в области нейробиоуправления делятся своими взглядами и достижениями в этой перспективной области

Литература

Мельников М.Е., Безматерных Д.Д., Козлова Л.И. и др. Нейротерапия нового поколения // НАУКА из первых рук. 2016. № 5/6(71/72). С. 110–119.

Штарк М.Б., Веревкин Е.Г., Козлова Л.И. и др. Синергичное фМРТ-ЭЭГ картирование головного мозга в режиме произвольного управления альфа-ритмом // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2014. Т. 158, № 1. С. 594–599.

Штарк М.Б., Джафарова О.А., Тарасов Е.А. и др. Дистанционная реабилитация мозговых катастроф. Сетевые технологии компьютерного биоуправления // НАУКА из первых рук. 2014. № 2(56). С. 54–65.

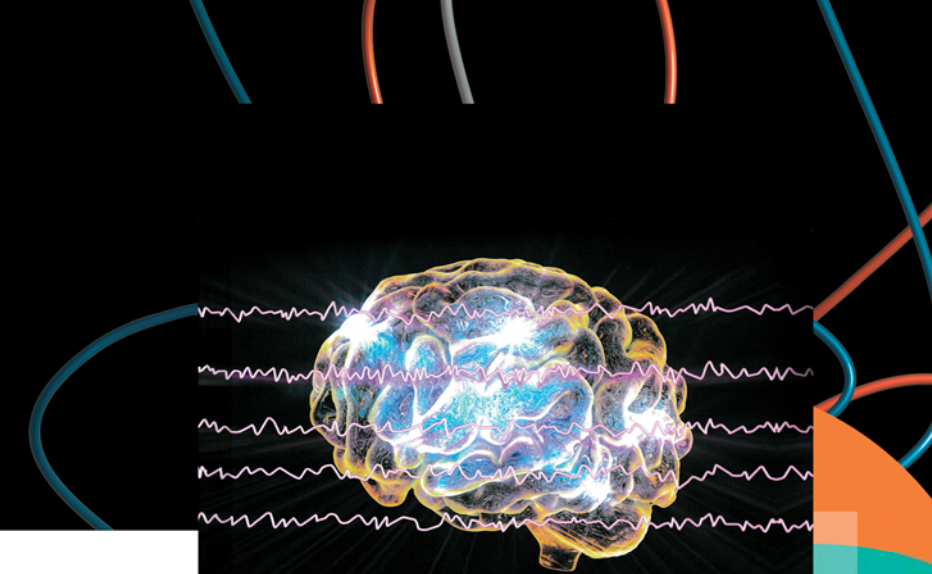
Штарк М.Б., Савелов А.А., Резакова М.В. и др. Как увидеть мысли. Неортодоксальные приложения магнитно-резонансной томографии // НАУКА из первых рук. 2013. № 4(52). С. 32–43.

Bezmaternykh D. D., Mel'nikov M. E., Kozlova L. I. Functional Connectivity of Brain Regions According to Resting State fMRI: Differences between Healthy and Depressed Subjects and Variability of the Results // Bull. Exp. Biol. Med. 2018. V. 165. N. 6. P. 734–740.

Keynan J. N. Electrical fingerprint of the amygdala guides neurofeedback training for stress resilience // Nat. Human Behav. 2019. V. 3. P. 63–73.

Mano M., Lécuycer A., Bannier E. et al. How to Build a Hybrid Neurofeedback Platform Combining EEG and fMRI // Frontiers Neurosci. 2017. V. 11. P. 1–16.

Mel'nikov M. E., Savelov A. A., Shtark M. B. et al. Experience in Continuous Neurobiocontrol Using fMRI Signals from the Primary Motor Cortex Using a 1.5-T MR Tomograph // Neurosci. Behav. Physiol. 2018. V. 48, N. 4. P. 474–482.



NEUROFEEDBACK

THE FIRST FIFTY YEARS

Edited by
James R. Evans, Mary Blair Dellinger
Harold L. Russell



Qiong Wu, Zan Yue, Yunxiang Ge et al. Brain Functional Networks Study of Subacute Stroke Patients With Upper Limb Dysfunction After Comprehensive Rehabilitation Including BCI Training // Front. Neurol. 27 January 2020. P. 1–14. DOI: 10.3389/fneur.2019.01419.

Shtark M. B., Kozlova L. I., Bezmaternykh D. D. et al. Neuroimaging Study of Alpha and Beta EEG biofeedback Effects Neural Networks // Appl. Psychophys. Biofeedback. 2018. V. 43. P. 169–178.

Sitaram R., Veit R., Stevens B. et al. Acquired control of ventral premotor cortex activity by feedback training: an exploratory real-time fMRI and TMS study // Neurorehabilitation Neural Repair. 2012. V. 26. N. 3. P. 256–265.

Shtark M. B. Neurofeedback: A scarce resource at the mental market // Neurofeedback. The first fifty years / Ed. by J. R. Evans, M. B. Dellinger, H. L. Russell. 2020. P. 353–358.

Zotev V., Phillips R., Han Yuan et al. Self-regulation of human brain activity using simultaneous real-time fMRI and EEG neurofeedback // NeuroImage. 2014. N. 85. P. 985–995.