

УДК 612.821.2

## НЕЙРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНСАЙТА (РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЗАРЕНИЕМ)

© 2020 г. И. С. Бакулин<sup>а</sup>, А. Г. Пойдашева<sup>а, \*</sup>, А. А. Медынец<sup>б</sup>, Д. Ю. Лагода<sup>а</sup>, Е. И. Кремнева<sup>а</sup>,  
Л. А. Легостаева<sup>а</sup>, Д. О. Симицын<sup>а</sup>, Н. А. Супонева<sup>а</sup>, М. А. Пирадов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>ФГБНУ “Научный центр неврологии”, Москва, Россия

<sup>б</sup>ФГБНУ “Институт психологии РАН”, Москва, Россия

\*e-mail: alexandra.poydasheva@gmail.com

Поступила в редакцию 11.06.2019 г.

После доработки 04.10.2019 г.

Принята к публикации 05.10.2019 г.

Инсайт – внезапное и непредсказуемое появление решения задачи (озарение) – является одним из интенсивно изучаемых феноменов, связанных с творческим мышлением и креативностью. В статье анализируются результаты изучения нейробиологических основ инсайта с применением нейровизуализационных и нейрофизиологических методов. Обсуждаются подходы к определению инсайта и используемые в исследованиях задания для его выявления. Рассматривается потенциальный вклад различных структур головного мозга и нейрональных сетей в возникновение инсайта на разных этапах решения задания. Отдельно обсуждаются особенности базовой активности головного мозга, ассоциированные с возникновением инсайта. Особое внимание уделено исследованиям с применением методов неинвазивной стимуляции мозга, которые могут использоваться для модуляции частоты инсайтных решений и уточнения роли отдельных структур головного мозга в возникновении инсайта.

**Ключевые слова:** инсайт, креативность, функциональная МРТ, ЭЭГ, вызванные потенциалы, неинвазивная стимуляция мозга, транскраниальная стимуляция постоянным током, нейромодуляция, нейровизуализация

**DOI:** 10.31857/S0301179820010038

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение нейробиологических основ творческого мышления и креативности является одним из наиболее актуальных и интересных направлений современной нейронауки. В условиях возрастающей автоматизации и роботизации большинства сфер деятельности, творчество и креативность остаются важнейшими ресурсами человеческого интеллекта, определяющими создание инновационных продуктов и социально-экономический прогресс.

В течение длительного времени творческое мышление и креативность являются объектом психологических исследований [6, 7, 9, 10]. В последние десятилетия активное развитие методов визуализации и регистрации активности головного мозга *in vivo* позволило вплотную подойти к изучению мозговой организации и нейрональных механизмов, лежащих в основе творчества и креативности [2, 3, 12, 16, 24, 39–41].

Согласно концепции Я.А. Пономарева (1976), творческое мышление определяется двумя компонентами: логическим и интуитивным. При

этом работа интуитивного компонента, хотя и не осознается индивидом, но играет важную роль в поиске решения [7]. Одним из доступных изучению феноменов, связанных с работой интуитивного компонента, является феномен инсайта или “внезапного озарения” (“ага!”-момент или “эврика!”).

В классической модели творческого поиска решения Грэм Уоллес (1926) выделяет четыре его этапа: 1) этап подготовки (формулировка проблемы, сознательная попытка ее решения); 2) этап инкубации или созревания (решатель не работает над проблемой сознательно, хотя бессознательная работа ведется); 3) инсайт (озарение) – спонтанное появление решения проблемы, часто сопровождающееся ярким эмоциональным переживанием; 4) проверка, включающая оценку и доработку возникшего решения на сознательном уровне (по [6]). Таким образом, инсайт является ключевым моментом акта творчества, являясь своего рода маркером творческого мышления.

Примеры инсайтных решений сложных задач широко представлены в истории науки. Открытия закона Архимеда, закона всемирного тяготения

ния И. Ньютоном, структуры бензола Ф.А. Кекуле и структуры Млечного Пути У. Морганом демонстрируют основные характеристики феномена инсайта: внезапность, яркую эмоциональную окрашенность и непредсказуемость [60, 92]. Во всех случаях инсайту предшествовал период длительного размышления, однако само инсайтное решение возникало внезапно, в период отсутствия осознанной работы над задачей. Инсайт играет большую роль не только при совершении научных открытий, но и в повседневной жизни, при решении большого количества различных задач [52, 81]. Показано, что феномен инсайта ассоциирован с инновационным мышлением, а опыт его переживания увеличивает мотивацию и улучшает обучение [59, 102]. Изучение нейробиологических основ инсайта может иметь большое значение для понимания природы творческого мышления и креативности, а также разработки новых подходов к улучшению решения различных задач и обучения.

В настоящем обзоре анализируются результаты исследований нейробиологических основ инсайта с применением нейровизуализационных и нейрофизиологических методов (функциональной МРТ (фМРТ), электроэнцефалографии (ЭЭГ), вызванных потенциалов (ВП) и других). Основной акцент сделан на возможный вклад различных структур головного мозга и нейрональных сетей в происхождение феномена инсайта (более детальное систематическое описание результатов исследований с разделением в зависимости от применяемых методов представлено в обзорах [41] и [92]). Отдельно анализируются особенности базовой активности головного мозга в покое, ассоциированные с феноменом инсайта. Особое внимание уделено исследованиям с применением методов неинвазивной стимуляции головного мозга, которые за счет направленной модуляции активности отдельных участков коры способны изменять частоту инсайтных решений.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ИНСАЙТА

Предложено выделять 3 основных стратегии или способа решения задачи: аналитический, извлечение из памяти и инсайт. Аналитический способ решения характеризуется следующими признаками: 1) является преднамеренным и в основном осознанным; 2) состоит из нескольких этапов (от момента получения условий до решения); 3) решающий может подробно объяснить, как именно он добился решения задачи. Извлечение из памяти может быть описано как простой поиск ранее приобретенных знаний, которые могут быть применены в текущей ситуации для решения предложенной задачи [78]. Инсайт можно определить как нахождение решения задачи, со-

ответствующее трем основным критериям: 1) субъект переживает такое решение как возникшее неожиданно, при этом оно является верным; 2) инсайту в большинстве случаев предшествуют длительные и непродуктивные попытки решить проблему; 3) субъект, переживший инсайт, не может рассказать, как ему удалось прийти к решению [23].

Начало научного изучения феномена инсайта было положено в рамках гештальт-психологии. В работах немецкого психолога Карла Дункера было отмечено, что поиск решения задачи часто происходит неравномерно во времени, чередуя периоды “топтания на месте” с резким и заметным продвижением в решении. Исследователь объяснял такую скачкообразность результатом переструктурирования проблемного поля, аналогичным переструктурированию зрительного поля при восприятии двусмысленных изображений [5]. Еще одним вкладом Карла Дункера стало введение понятия “функциональной фиксированности” (“функциональной закрепленности”, англ. – “functional fixedness”) – затруднения в неспецифическом использовании объектов и элементов задачи при ее решении, связанного с индивидуальным опытом решателя [5]. Таким образом, инсайт можно рассматривать как результат переструктурирования репрезентации проблемы в результате преодоления функциональной фиксированности.

Согласно определению, предложенному Коупиос и Веeman в 2014 г., инсайт представляет собой “любое внезапное понимание, осознание или решение проблемы, которые связаны с реорганизацией элементов персональной умственной репрезентации стимула, ситуации или проблемы в сторону неочевидной или недоминантной интерпретации” [60]. В рамках этого определения возникновение “тупика” при решении задачи не является обязательными признаком инсайтного решения. Кроме того, положительные эмоциональные переживания в рамках данного определения рассматриваются как дополнительный признак инсайтного решения, так как аффективная реакция часто не регистрируется при изучении инсайта в экспериментальных условиях [60].

К настоящему времени предложено большое количество различных задач, в процессе решения которых изучается феномен инсайта. В рамках классического подхода, рассматривающего инсайт прежде всего как процесс переструктурирования репрезентации проблемы, используются специальные, так называемые “инсайтные” задачи [4, 8, 34, 58, 71]. Решение таких задач в большинстве случаев требует отказа от привычных алгоритмов или привычных стереотипных способов манипулирования с объектами, то есть снятия функциональной фиксированности. Классическими при-

мерами такого рода являются “задача со свечой”, “задача 9 точек” и “проблема 8 монет”. Например, в случае с “задачей 9 точек” необходимо соединить 9 точек, расположенных в 3 ряда, с помощью четырех прямых линий, не отрывая карандаша (ручки) от поверхности листа. Функциональной фиксированностью в этой задаче является отсутствующее в условиях задачи стереотипное ограничение не выходить за пределы поля с точками. Снятие этой фиксированности приводит к правильному решению задачи и расценивается как инсайт [58]. Проблемы подобного рода широко используются при изучении феномена инсайта, однако их применение имеет ряд ограничений: 1) в большинстве случаев задачи являются крайне сложными и мало испытуемых могут их решить; 2) решение этих задач требует достаточно продолжительного времени; 3) каждая такая задача может быть предложена для решения испытуемому только один раз, что делает невозможным исследование с повторной оценкой; 4) практически все такие задачи являются невербальными; 5) эти задачи крайне гетерогенны [92]. Важно отметить, что, по данным ряда исследований, эти задачи могут решаться не только с помощью инсайта, но и с использованием других стратегий [8, 24, 36, 44]. Поскольку эти задания предполагают длительное и однократное размышление над одной проблемой, их применение ограничено в исследованиях с применением нейрофизиологических и нейровизуализационных методов, требующих, как правило, неоднократного повторения ряда сходных заданий [23, 92].

Для преодоления этих ограничений классических инсайтных задач используется целый ряд заданий другого типа. Их особенностями являются возможность составления практически неограниченного количества сходных задач для предъявления одному испытуемому и небольшое время, затрачиваемое на решение каждой из них. Примерами таких заданий являются анаграммы, загадки (riddles), китайские логогрифы, арифметические головоломки со спичками, триады слов из теста отдаленных ассоциаций Медника (Remote Associates Task, RAT) и другие [23, 92, 102]. Например, при использовании анаграмм суть задания состоит в перестановке предъявляемых букв для получения слова (ОТНАЦЯИ=НОТАЦИЯ) [102]. Суть теста отдаленных ассоциаций Медника (RAT) заключается в предъявлении тройки слов, принадлежащих к отдаленным ассоциативным областям. Испытуемый должен установить между ними ассоциативную связь, подобрать четвертое слово, образующее с каждым из них словосочетание [70]. В настоящее время в исследованиях по изучению инсайта часто используется близкий к тесту Медника тест CRA (от англ. – Compound Remote Associations), при котором предлагаемое испытуемым слово должно об-

разовывать новое сложное слово с каждым словом из условия [23]. Целый ряд особенностей определяют преимущества применения CRA и RAT при изучении нейробиологических основ феномена инсайта: 1) они могут быть решены в течение нескольких секунд многими испытуемыми; 2) задание удобно предъявлять испытуемому на экране; 3) решение является уникальным словом, что облегчает оценку и интерпретацию результатов; 4) сложность задания может варьировать в широких пределах; 5) возможность подбора большого количества сопоставимых по сложности и идентичных по структуре заданий [92]. Эти же особенности в определенной степени характерны для заданий с анаграммами, которые также часто используются для изучения нейробиологических основ инсайта [60].

Необходимо отдельно отметить еще одну важную особенность названных тестов: каждое задание может быть решено с применением как инсайтной, так и аналитической стратегии [92]. Это имеет большое значение при проведении исследований с применением современных нейрофизиологических и нейровизуализационных методов. Активность головного мозга, регистрируемая во время решения задания, может являться как специфичной для инсайта, так и иметь более общий характер, отражая различные когнитивные компоненты решения задачи. Кроме того, нейронные сети, задействованные в инсайтном и аналитическом решении задач, могут в различной степени перекрываться между собой. Возможность инсайтного и аналитического решения одного и того же задания позволяет сопоставить паттерны активации головного мозга при использовании разных стратегий и может способствовать выявлению областей головного мозга и паттернов активности, ассоциированных именно с инсайтным решением.

Определение способа решения задания (инсайтным или аналитическим путем) в большинстве случаев основано на самоотчете испытуемых, которые предварительно инструктируются относительно того, какое решение считать инсайтом [34, 65]. Альтернативным является подход, основанный на регистрации на разных этапах выполнения задания субъективной близости испытуемого к решению по данным его ощущений (“тепло” или “холодно”) [71]. В этом случае аналитическое решение должно характеризоваться последовательным (градуальным) приближением к правильному решению, в то время как при инсайте наблюдается внезапный переход от состояния “далек от решения (холодно)” к правильному ответу. Необходимо отметить, что результаты определения стратегии решения заданий при использовании этих двух подходов недостаточно согласуются между собой [65]. Кроме того, метод, основанный на оценке субъективной близости,

требует определенной длительности процесса решения, и мало применим в исследованиях с применением нейровизуализационных и нейрофизиологических методов. По мнению Laukkonen и Tangen (2018), подход, основанный на самоотчете испытуемых, в настоящее время предпочтителен для определения инсайта и с теоретической, и с методологической точки зрения [65].

### НЕЙРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНСАЙТА

Одно из наиболее продуктивных направлений изучения нейробиологических основ феномена инсайта основано на концепции, согласно которой инсайтное решение задач в большей степени ассоциировано с активностью правого полушария, а аналитическое – с активностью левого [62]. Наиболее убедительное подтверждение этой концепции было получено в исследовании, проведенном Jung-Beeman и соавт. (2004) [56]. Было показано, что в момент инсайтного решения теста CRA (за 300 мс до нажатия кнопки), по данным ЭЭГ регистрируется усиление гамма-активности над височной долей правого полушария, а фМРТ в это время демонстрирует статистически значимо большее увеличение активации в передней части правой верхней височной извилины при сравнении с аналитическим решением задачи [56]. Эти данные были подтверждены в исследовании с записью ВП во время разгадывания “китайских анаграмм”, выявившем при инсайтном решении по сравнению с аналитическим большее по амплитуде негативное отклонение с латентностью 640–780 мс, генератор которого был локализован в правой верхней височной извилине [105]. Роль правой верхней височной извилины при инсайте может быть связана с обеспечением интеграции информации, установлением связей между элементами задания, семантическим кодированием и формированием новых ассоциаций [56, 105]. Также необходимо отметить, что увеличению гамма-активности в височной доле правого полушария при инсайтном решении задачи предшествует увеличение активности в альфа-диапазоне (около 10 Гц), регистрируемое над правой затылочной долей, которое может отражать ингибирование сенсорного входа для облегчения подсознательного решения задачи [56, 62].

Потенциально доминирующая роль правого полушария в возникновении инсайта может быть связана с особенностями структурно-функциональной организации его коры [48, 50, 62]. В частности, в правом полушарии по сравнению с левым выявлена более сильная коннективность (связность) между регионами [48, 51]. Кроме того, в правом полушарии наблюдается активация более широкого семантического поля при работе с определенной ситуацией, в то время как в левом

полушарии это поле более тесно связано с текущим контекстом [32]. Эти данные косвенно подтверждают концепцию, согласно которой правое полушарие в большей степени связано с воображением, пониманием образной речи, метафорическим мышлением и концептуализацией [38, 49]. В связи с этим необходимо отметить, что в наблюдениях за пациентами с локальным повреждением левого полушария в части случаев отмечено усиление музыкальных или художественных способностей [38, 73]. Этот феномен может быть объяснен парадоксальной “функциональной фасилитацией” правого полушария вследствие уменьшения его торможения поврежденным левым полушарием [57].

Несмотря на определенную теоретическую обоснованность, предположение о доминирующей роли правого полушария в возникновении инсайта не нашло подтверждения в большом количестве исследований [41, 92]. Не нашли подтверждения также данные о более выраженной активации при инсайтном решении по сравнению с аналитическим правой верхней височной извилины [92]. Нельзя исключить, что активация правой височной извилины отражает специфику теста на отдаленные ассоциации и поэтому не выявляется при использовании других заданий. По данным большинства работ инсайт ассоциирован с билатеральной активацией различных структур головного мозга. Например, в одном из исследований показано, что инсайтное решение анаграмм ассоциировано с активацией коры островка с двух сторон, зоны Брока, правой префронтальной коры и передней поясной коры [13]. По данным другой работы, инсайтное решение китайских логогрифов по сравнению с неинсайтным сопровождается более выраженной активацией предклинья, верхней теменной доли и нижней затылочной извилины с двух сторон, левых нижней и средней лобных извилин, нижней затылочной извилины и мозжечка [82]. В метаанализе (объединении результатов 13 исследований с применением фМРТ) выявлено 11 кластеров активации, ассоциированных с возникновением инсайта, включая левую премоторную/дополнительную моторную кору, левые среднюю височную извилину и предклинья, правую верхнюю лобную извилину, левую поясную извилину, левую ограду, правую и левую средние височные извилины, правый и левый островки, правое предклинье и ряд других участков; при этом большинство областей активации расположено в левом полушарии [92]. Эти данные подкрепляют необходимость изучения инсайта с точки зрения анализа активности нейронных сетей с уточнением роли отдельных их компонентов.

При использовании такого подхода становится очевидной сложность выявления специфичной для инсайта нейрональной сети, поскольку реги-

оны головного мозга, активность которых ассоциирована с инсайтом, также связаны и с другими когнитивными процессами. Например, активность средней и нижней лобной извилин, а также передней поясной коры ассоциирована с памятью, вниманием, общим когнитивным контролем и креативностью [18, 20, 74, 104]. Верхняя лобная извилина играет важную роль в обеспечении исполнительных функций, рабочей памяти, пространственно-ориентированной обработки, а также участвует в планировании деятельности и поддержании мотивации [42]. Отмечено значительное перекрытие кластеров активации при инсайте с компонентами левой исполнительной сети и передней сети выявления значимости [92]. Особое значение имеет перекрытие нейрональных сетей, ассоциированных с инсайтом и креативностью [20, 92], указывающее на сходство лежащего в их основе нейроанатомического субстрата, несмотря на противоречивые данные о связи между ними на поведенческом уровне [12, 23, 41, 76].

С возникновением инсайта ассоциирована активность нескольких регионов коры головного мозга, входящих в сеть выявления значимости (salience network), таких как средняя височная извилина, ограда и прецентральная извилина [92]. Сеть выявления значимости играет важную роль в перераспределении внимания между внешними стимулами и внутренними событиями, обеспечивая динамическое переключение между сетью пассивного режима работы мозга и исполнительной сетью [25, 93], которые, в свою очередь, играют важную роль в креативном мышлении [14, 17]. Интересно отметить, что креативность в тесте на дивергентное мышление ассоциирована с усилением функциональной коннективности (связности) между хабами (узлами) этих трех сетей [15].

Передняя поясная кора, активация которой при инсайте выявлена в ряде исследований, может осуществлять функции мониторинга возможных конфликтных решений, связанных с активностью других регионов мозга, и обеспечивать “разрыв шаблона” [13, 22, 68, 69, 95, 107]. Предполагается, что высокая активность передней поясной коры перед решением задачи через инсайт может способствовать обнаружению недоминирующих решений и слабых отдаленных ассоциаций, связанных с активностью правого полушария. При низкой активности передней поясной коры, напротив, отмечается преобладание более очевидных ассоциаций и способов решения задачи стандартным аналитическим путем [60, 96]. Показано увеличение активации передней поясной коры и задней части средней и верхней височных извилин с двух сторон на этапе подготовки к решению задания CRA (до его предъявления), в случаях, когда задание будет в последующем решено через инсайт [62]. Кроме того, в исследовании с применением ВП показано, что успешному решению

китайских логогрифов по сравнению с неуспешным за 800–1000 мс до предъявления задания предшествует больший по амплитуде позитивный пик, генератор которого был локализован в передней поясной коре [83]. На этапе подготовки к выполнению задания роль передней поясной коры может быть связана с подавлением неактуальных мыслей, относящихся к прошлому заданию или связанных с отвлеченной темой, что позволяет начать решение нового задания “с чистого листа” [62].

Передняя поясная кора может являться основным генератором негативного отклонения с латентностью 300–800 мс (N400), амплитуда которого больше при инсайтном решении по сравнению с аналитическим [67, 69, 84, 101, 106]. Хотя этот пик может являться коррелятом семантической обработки [64], он также может отражать преодоление ментальной установки и конфликт между уже известным и новым способом решения задания [67, 69, 84, 92, 101]. Кроме того, передняя поясная кора также является одним из генераторов позитивного пика с латентностью 300–800 мс (P300), который также может отражать преодоление ментальной установки [101]. Необходимо отметить, что были выявлены и альтернативные генераторы этого пика – левая верхняя височная извилина и область стыка височной, теменной и затылочной долей, а также веретенообразная извилина [92, 105].

Большое значение для инсайта может иметь средняя височная извилина, двусторонняя активация которой при инсайте подтверждена в мета-анализе исследований с применением фМРТ [92]. Средняя височная извилина участвует в ассоциативно-семантической обработке и интеграции информации, а также ее реструктуризации [47, 100]. По некоторым данным, более выраженная билатеральная активация средних височных извилин при инсайтном решении китайских загадок по сравнению с неинсайтным наблюдается как в раннем, так и в позднем периоде решения и может отражать вовлечение широкой семантической сети для выполнения задания [107]. Кроме того, показано, что при инсайтном решении наблюдается большее увеличение функциональной коннективности между средней височной и нижней лобной извилинами в правом полушарии по сравнению с неинсайтным решением [108]. Роль предклинья при инсайте может быть связана с извлечением из эпизодической памяти прототипа события [82]. Косвенным подтверждением значения этого участка коры при инсайте является выявленная в нескольких исследованиях корреляция между толщиной серого вещества в предклинье и различными показателями, оценивающими креативность [28, 53, 96].

В целом ряде исследований показано, что большое значение для инсайтного решения задачи может иметь правая префронтальная кора. Показано, что инсайтному решению вербального пазла предшествует увеличение активности в гамма-диапазоне (30–100 Гц), регистрируемое над правыми лобными и центральными электродами [90]. При решении задачи, известной как “треугольник из 10 монет”, было выявлено увеличение мощности бета 2- и гамма-активности в правой лобной доле, которое появляется за 8 с до инсайтного решения [87]. Была показана более выраженная активация (по данным фМРТ) правой префронтальной коры при инсайтном решении анаграмм по сравнению с аналитическим [13]. Кроме того, показана более выраженная активация правой префронтальной коры при возникновении конфликта в логическом решении, что может указывать на ее роль при изменении стратегии решения задачи [45, 87]. Эти данные подтверждаются также и наблюдениями за пациентами с локальным поражением головного мозга. Для пациентов с поражением правой лобной доли характерны нарушения способности к изменению стратегии решения инсайтной задачи с 9 точками, которые не наблюдаются при локализации поражения в левой лобной доле, а также в левой и правой височно-затылочной областях (у пациентов с поражением теменной доли были выявлены нарушения манипуляций со зрительными объектами) [75].

Суммарно полученные данные позволяют предполагать, что правая префронтальная кора играет важную роль на этапе изменения стратегии решения задачи (тупика при использовании предыдущей стратегии), когда необходимы реконструкция репрезентации задания в памяти, проявление гибкости и включение дивергентного мышления. Предполагается, что именно с этим связано усиление бета- и гамма-активности в правой префронтальной коре перед возникновением инсайтного решения [87]. Важно отметить, что при аналитическом решении эта активность, напротив, уменьшается (для аналитического решения авторы используют термин “incremental”, что отражает постепенность решения задания). Кроме того, активация правой префронтальной коры может отражать важную роль при принятии инсайтного решения произвольного внимания, с которым ассоциирована гамма-активность в лобных долях [87].

С другой стороны, показано, что латеральная префронтальная кора может обеспечивать контроль активности других областей коры при активации передней поясной коры, ограничивая спектр возможных стратегий и фокусируя внимание, прежде всего, на небольшом количестве наиболее очевидных решений (формирование “пространства ответа”) [62, 74]. При работе над зада-

чами с нестандартным решением эта функция латеральной префронтальной коры может играть отрицательную роль. Показано, что пациенты с поражением (в большинстве случаев двусторонним) латеральной префронтальной коры статистически значимо лучше, чем здоровые добровольцы и пациенты с повреждением медиальной префронтальной коры, решают наиболее сложный вид арифметических головоломок со спичками [86].

При рассмотрении роли префронтальной коры необходимо учитывать, что инсайт является только первым этапом преобразования информации в креативное решение [40]. После возникновения инсайта роль префронтальной коры может быть связана с привлечением к работе над проблемой направленного внимания, памяти, абстрактного мышления с учетом уместности решения в конкретных условиях, что, в частности, позволяет отбрасывать большое количество неверных или тривиальных решений. Данная концепция косвенно подтверждается ассоциацией активации правой префронтальной коры при инсайтном решении со временем нахождения решения, а не процессом решения. Это позволяет предполагать, что активация правой префронтальной коры играет в большей степени роль в оценке инсайтного решения, а не его генерации [13].

При обсуждении роли лобных долей при инсайте необходимо также отметить, что одной из наиболее воспроизводимых нейрофизиологических находок при изучении этого феномена является снижение мощности альфа-ритма (больше справа) и когерентности альфа-ритма с двух сторон, регистрируемые с лобных отведений [37, 85, 88, 92]. При выполнении теста CRA также показано снижение альфа-когерентности между лобными и височными регионами и увеличение десинхронизации, более выраженное в задних отделах коры [85].

Еще одним регионом мозга, активация которого ассоциирована с инсайтом, является островок [13]. Роль островка при инсайте может быть связана с его участием в interoцепции и обеспечении баланса между внутренними и внешними стимулами [77]. Кроме того, островок может иметь значение для реализации различных аспектов как понимания, так и продукции речи [80]. Передняя часть островка является одним из хабов (узлов) сети выявления значимости [98]. Необходимо отметить, что при разгадывании анаграмм в случае инсайтного решения наблюдается двусторонняя активация островка, в то время как аналитическое решение ассоциировано с активацией островка только слева [13]. Эти данные дополнительно подтверждают роль взаимодействия полушарий в возникновении инсайта.

Кроме корковых областей, в возникновении феномена инсайта принимают участие и подкорковые структуры. В частности, в метаанализе исследований с применением фМРТ показана ассоциация инсайта с большим кластером активации в левой оградке [92] — структуре, играющей важную роль в объединении участков коры, связанных с поддержанием внимания [46], а также в регуляции уровня сознания [63]. При инсайте ограда может выступать как центр мониторинга при “уходе в свои мысли” (mind-wandering), позволяющий разуму “дрейфовать” во время первой реорганизации доступной информации и возникать правильному решению из его подсознательной репрезентации [92]. Поздний период инсайта ассоциирован с активацией миндалины и гиппокампа [107].

В исследовании с использованием 7 Тл фМРТ показано, что инсайт ассоциирован с билатеральной активацией таламуса, гиппокампа и структур, имеющих отношение к дофаминергической системе (вентральная покрышечная область, прилежащее ядро и хвостатое ядро) [97]. Эти данные могут демонстрировать участие аффективных нейрональных механизмов в возникновении инсайта. В частности, активации при инсайтном решении прилежащего ядра, имеющего обширные афферентные и эфферентные связи с различными корковыми и подкорковыми структурами и входящего в систему вознаграждения [26], может отражать внезапное появление нового решения, сопровождающееся ощущением легкости, радости и уверенности [97]. Положительное эмоциональное подкрепление может приводить к улучшению консолидации информации, что сопровождается увеличением активации гиппокампов и может быть связано с положительным эффектом инсайта в отношении обучения. Крайне интересной представляется также роль дофаминергической системы головного мозга в отношении инсайта. Выявлено, что умеренный уровень стриарного дофамина способствует креативному мышлению, увеличивая гибкость когнитивных процессов [21], что может отражать роль полосатого тела в возникновении инсайта за счет улучшения дивергентного мышления и облегчения доступа к отдаленным ассоциациям [97]. Активация при инсайте вентральной покрышечной области может отражать характерный для инсайта феномен уверенности в правильности ответа [97].

Анализируя проведенные к настоящему времени исследования в области изучения нейробиологических основ инсайта, необходимо отметить их выраженную гетерогенность с точки зрения методологии и использованных заданий для выявления инсайта. Однако в целом представленные данные демонстрируют, что инсайт как психологический феномен связан с различными регионами мозга и взаимодействием различных нейрональных сетей, которые могут иг-

реть роль как непосредственно в его возникновении, так и на подготовительном этапе, во время начальных этапов работы над задачей. Однако до настоящего времени точная роль различных участков коры при инсайте остается недостаточно изученной.

## ИНСАЙТ И БАЗОВАЯ АКТИВНОСТЬ МОЗГА

Еще одним важным направлением исследований является поиск особенностей базовой нейрональной активности мозга, ассоциированных с преимущественно инсайтным или аналитическим решением заданий. При анализе ЭЭГ покоя у испытуемых, разделенных в зависимости от частоты инсайтных решений анаграмм, показано, что для испытуемых с высокой частотой инсайтных решений характерны большая активность правого и меньшая активность левого полушария [61]. В частности, при высокой частоте инсайтных решений были выявлены большая мощность в низкочастотном альфа-диапазоне над правыми дорзальными лобными электродами, в бета- и гамма-диапазоне — над правыми нижними лобными электродами, в гамма-диапазоне — над правыми теменными электродами; а также меньшая мощность в низкочастотном альфа-диапазоне над левыми нижними лобными и передними височными электродами. Эти данные в целом подтверждают концепцию о роли межполушарной асимметрии для развития инсайта. Второй особенностью ЭЭГ покоя при высокой частоте инсайтных решений, по данным этого исследования, является меньшая мощность альфа- и бета1-ритма над затылочной корой, что может указывать на более дефокусированное внимание [61]. В другом исследовании, напротив, показано, что частота инсайтных решений математической задачи (Math 24) положительно коррелирует с мощностью высокочастотного альфа- и бета-ритма над левой затылочной областью. Противоположные результаты этих двух исследований могут быть частично объяснены использованием разных заданий для выявления инсайта [103].

Еще в одном исследовании анализировались особенности ЭЭГ покоя, предрасполагающие к инсайтному или аналитическому решению теста CRA и заданий с анаграммами [43]. Было показано, что высокая частота инсайтных решений ассоциирована с увеличением мощности бета-ритма над левыми теменными и тета-/альфа-ритма над левыми височными электродами, а высокая частота аналитических решений — с увеличением мощности бета-ритма над лобными электродами [43]. Интерпретация этих данных возможна с учетом межполушарных модели семантической обработки информации, предполагающей ведущее значение левой височной коры для обработки

прочных и близких ассоциаций, а правой – для обработки слабых и отдаленных [55]. Поскольку осцилляции в альфа-диапазоне связаны с тормозными механизмами [54], увеличение альфа-ритма над левыми височными электродами может быть обусловлено более выраженным торможением левой височной коры и связанных с ней близких ассоциаций при доминирующей инсайтной стратегии по сравнению с доминирующей аналитической стратегией. Это, в свою очередь, облегчает возникновение слабых и отдаленных ассоциаций, связанных с правой височной корой, и способствует возникновению инсайтного решения [43]. Более высокая мощность бета-ритма над лобными электродами при доминирующей аналитической стратегии может отражать наличие в этом случае усиленного исполнительного контроля со стороны лобных долей. Напротив, при доминирующей инсайтной стратегии уменьшение активности лобных долей и увеличение активности задних отделов коры могут способствовать творческому подходу к решению задачи и возникновению инсайта [33, 44]. Важно отметить, что в этой работе, в отличие от двух предыдущих исследований, ЭЭГ проводилась за несколько недель до поведенческих тестов, а не непосредственно перед ними, что позволяет говорить о наличии стабильных особенностей нейрональной активности, ассоциированных с доминирующей стратегией решения задач [44].

Второе направление исследований в области выявления базовых особенностей структурной и функциональной организации мозга связано с применением современных методов нейровизуализации. В крупном исследовании с включением 232 здоровых добровольцев и применением фМРТ покоя и воксель-ориентированной морфометрии показано, что суммарный балл по батарее тестов для выявления инсайта (Insight test Battery, ITB) положительно коррелирует с объемом серого вещества в правом островке и правой поясной коре/предклинье и отрицательно коррелирует с объемом серого вещества в левой верхней полулунной дольке мозжечка и правой дополнительной моторной коре [79]. Анализ функциональной коннективности с помощью фМРТ покоя показал наличие инсайт-позитивных связей между правой средней поясной корой/предклиньем и правой средней височной извилиной, левой верхней полулунной долькой мозжечка и правой медиальной орбитофронтальной корой и инсайт-отрицательных связей между левой верхней полулунной долькой мозжечка и левой нижней теменной долькой [79]. В другом исследовании для выявления регионов мозга, ассоциированных с индивидуальными различиями возникновения инсайтных решений, использовался анализ амплитуды низкочастотных флуктуаций по данным фМРТ покоя [66]. В качестве задания участники иссле-

дования должны были преобразовывать один китайский иероглиф в другой, например, путем удаления одной из его частей. При проведении регрессионного анализа было выявлено, что среднее время решения заданий статистически значимо положительно коррелирует с амплитудой низкочастотных флуктуаций в правой верхней лобной извилине и отрицательно коррелирует с амплитудой в левой средней поясной извилине/коре островка, левой верхней височной извилине/ангулярной извилине, правой передней поясной извилине/хвостом ядра и вершине/скате мозжечка [66]. Полученные в этих исследованиях данные в целом демонстрируют, что инсайт ассоциирован с активностью различных нейрональных сетей, включая сеть пассивного режима работы мозга, семантическую сеть и корково-мозжечковые связи. Несмотря на небольшое количество исследований и противоречивость результатов, полученные к настоящему времени данные позволяют предполагать наличие структурных и функциональных особенностей головного мозга, ассоциированных с доминирующей стратегией решения задач и частотой инсайтных решений.

#### МОДУЛЯЦИЯ ИНСАЙТА С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ НЕИНВАЗИВНОЙ СТИМУЛЯЦИИ МОЗГА

Одним из перспективных подходов к изучению нейробиологических основ феномена инсайта является применение методов неинвазивной стимуляции головного мозга – транскраниальной магнитной стимуляции (ТМС) и транскраниальной электрической стимуляции (ТЭС). Интерес к использованию этих методов связан с возможностью модуляции активности стимулируемой области с последующей оценкой эффекта этого воздействия на изучаемый феномен. Это позволяет устанавливать причинно-следственную связь между изменением активности области интереса и измеряемым параметром. Применение методов неинвазивной стимуляции мозга, таким образом, позволяет уточнить и дополнить данные, полученные с применением методов нейровизуализации и ЭЭГ/ВП, ограничением которых является возможность выявлять только лишь корреляцию между определенными паттернами активности мозга и измеряемыми нейropsychологическими параметрами [19, 89, 91].

В настоящее время считается, что эффект ТМС и ТЭС на стимулируемую область связан с модуляцией процессов синаптической пластичности. Эффект ритмической ТМС (рТМС) определяется прежде всего частотой стимуляции: низкочастотная рТМС (1 Гц) уменьшает, а высокочастотная рТМС (более 1 Гц), напротив, увеличивает активность стимулируемой области

[29, 99]. Эффект ТЭС постоянным током (tDCS, от англ. transcranial direct current stimulation) зависит от монтажа электродов: под катодом отмечается уменьшение, а под анодом — увеличение активности [1, 94]. Хотя показана условность подобного разделения эффектов ТМС и tDCS, именно оно до сих пор используется при планировании большинства нейропсихологических исследований.

В одном из исследований изучался эффект билатеральной tDCS передней части правых и левых височных долей с различным монтажом электродов на решение инсайтной задачи — арифметической головоломки со спичками [31]. Задание состояло в исправлении ошибочного арифметического утверждения, представленного сложными из спичек римскими цифрами, путем перемещения спичек без изменения их количества. В этом исследовании оценивался эффект ментальной установки (mental set), заключающийся в тенденции решать задачи с учетом прошлого опыта решения подобных задач. До проведения tDCS испытуемым предлагалось решить несколько задач с реальными спичками и продемонстрировался правильный ответ при возникновении затруднений. После этого им предлагалось решить серию компьютеризированных задач, которые относились к одному типу (тип 1), так как каждую из них можно было решить путем замены “X” на “V” (стадия формирования ментальной установки). Включенные в исследование здоровые добровольцы ( $n = 60$ ) были разделены на 3 группы в зависимости от протокола: 1) катодная tDCS левой височной доли, анодная tDCS правой височной доли (L-, R+); 2) катодная tDCS правой височной доли, анодная tDCS левой височной доли (L+, R-); 3) имитация стимуляции. Интенсивность стимуляции в 1 и 2 группах составляла 1.6 мА. Стимуляция начиналась за 5 минут до начала и продолжалась до окончания второй фазы тестирования, которая состояла в решении двух головоломок со спичками с двумя другими типами решений (типы 2 и 3, на решение каждой головоломки максимально давалась 6 минут). В исследовании показано, что при стимуляции с монтажом электродов L-, R+ наблюдается статистически значимое увеличение частоты правильных решений обоих типов задач по сравнению с имитацией стимуляции. За 6 минут задача типа 2 (более сложная) была решена в группе активной стимуляции (L-, R+) в 60% случаев, в группе имитации стимуляции — в 20% ( $p = 0.022$ ); задача типа 3 — в 85 и 45% соответственно ( $p = 0.019$ ). Важно отметить, что противоположный монтаж электродов (L+, R-) не оказывал статистически значимого эффекта на частоту правильных решений задач обоих типов [31].

В другом исследовании изучалось влияние tDCS передней височной доли на решение классической инсайтной задачи с 9 точками [30]. Не-

смотря на кажущуюся простоту, эта задача крайне редко решается испытуемыми. В работе проводилось сравнение частоты ее решения при проведении имитации стимуляции и tDCS с монтажом электродов L-, R+ (1.6 мА). Испытуемые суммарно решали задачу в течение 9 мин, включая 3 мин до начала tDCS, 3 мин во время и 3 мин после tDCS. Продолжительность tDCS составляла 10 мин, оставшееся время испытуемые решали контрольное задание (арифметический пример). В группе активной стимуляции 5 из 11 испытуемых смогли решить задачу с 9 точками, в то время как в группе имитации стимуляции с заданием не справился ни один из 11 добровольцев [30]. Результаты этих двух исследований в целом демонстрируют, что увеличение активности левой височной доли и/или уменьшение активности правой височной доли сопровождаются значительным увеличением частоты инсайтных решений. В то же время, учитывая использованный в этих работах монтаж электродов, разделить вклад модуляции активности правого и левого полушарий в увеличение частоты инсайтных решений не представляется возможным.

Еще в одном исследовании проверялась гипотеза о положительном влиянии анодной tDCS передней части правой височной доли на частоту инсайтных решений [11]. Особенности этого исследования были: 1) сравнение эффекта анодной tDCS правой височной доли с имитацией стимуляции при билатеральном (катод — левая височная доля) и экстрацефалическом (катод — область левой щеки) монтаже электродов (для разделения эффекта активации височной коры правого полушария и ингибирования височной коры левого полушария); 2) использование двух вариантов заданий для оценки эффекта tDCS: вербального (RAT) и невербального (математическая головоломка со спичками). Активная стимуляция проводилась в течение 25 мин, интенсивность стимуляции — 1.6 мА. Выполнение тестовых заданий начиналось через 3 мин после начала стимуляции, для каждого монтажа электродов проводилось сравнение частоты правильных решений во время реальной стимуляции и имитации стимуляции. В отличие от ранее проведенных исследований, в этой работе было показано, что при обоих вариантах монтажа электродов анодная tDCS правой височной доли статистически значимо не влияет на частоту решений как вербального, так и невербального задания [11]. Среди ограничений этого исследования необходимо отметить отсутствие разделения инсайтных и неинсайтных решений теста RAT.

В трех исследованиях проводилось изучение влияния tDCS дорсолатеральной префронтальной коры на выполнение заданий RAT и CRA. В одном из исследований показано, что анодная tDCS (20 мин; 1 мА; катод — правая надглазнич-

ная область) левой ДЛПФК (F3) статистически значимо увеличивает частоту решения заданий RAT по сравнению с катодной tDCS ДЛПФК и имитацией стимуляции. Во второй части этого исследования показан положительный эффект на выполнение заданий RAT анодной tDCS левой (F3), но не правой (F4) ДЛПФК [27]. В другом исследовании выявлено, что анодная tDCS левой ДЛПФК (1 мА; 11 мин; катод – правая орбито-фронтальная кора) статистически значимо увеличивает точность выполнения теста CRA в отношении сложных заданий, при этом больший эффект был выявлен у испытуемых с более низкой мотивацией [72]. Необходимо отметить, что в этих исследованиях не проводилось разделения инсайтного и аналитического решений, а сами авторы рассматривают полученные результаты в контексте улучшения исполнительных функций при решении сложного вербального задания. Еще в одном исследовании показано, что анодная стимуляция левой ДЛПФК при билатеральном монтаже электродов (катод – правая ДЛПФК; 2 мА) статистически значимо увеличивает частоту правильных решений теста CRA во время стимуляции по сравнению как с противоположным монтажом электродов (анод – правая ДЛПФК, катод – левая ДЛПФК), так и с отсутствием стимуляции. Частота инсайтных и аналитических решений в группах активной стимуляции и отсутствия стимуляции статистически значимо не отличалась [109].

Интересные данные в этом исследовании были получены при билатеральной стимуляции другой области мозга – задней теменной коры. При обоих вариантах монтажа электродов (анод – правая теменная доля, катод – левая теменная доля и наоборот) было показано статистически значимое увеличение количества инсайтных решений теста CRA по сравнению с отсутствием стимуляции без влияния на собственную частоту правильных решений. Эти данные показывают, что оба протокола стимуляции могут однонаправленно влиять на выбор стратегии решения задачи, в частности, за счет влияния на внимание [109]. Ограничением этого исследования является использование билатерального монтажа электродов во всех случаях, что не позволяет дифференцировать модуляцию активности структур правого и левого полушария, а также отсутствие в качестве контроля имитации стимуляции.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В течение последних десятилетий активное изучение нейробиологических основ возникновения инсайта с применением нейрофизиологических и нейровизуализационных методов значительно улучшило понимание природы этого загадочного психологического феномена. Результаты проведенных исследований отчетливо свидетель-

ствуют о необходимости изучения нейробиологии инсайта с точки зрения активности сложных нейрональных сетей, компоненты которых играют определенную роль на разных этапах решения задачи. Показана возможность выявления ассоциированной с инсайтом активности головного мозга на разных этапах задания и при подготовке к его выполнению. Более того, выявлены ассоциированные с инсайтом особенности базовой активности мозга в покое, а также структурные корреляты высокой частоты инсайтных решений.

Тем не менее, до настоящего времени данных для построения полной и универсальной нейробиологической модели инсайта явно недостаточно. Одной из ведущих проблем является выраженная противоречивость и гетерогенность результатов проведенных исследований, важными причинами которых могут быть различия в методологии, использование различных заданий и небольшое количество участников в каждом исследовании. Возможно, эта проблема может быть отчасти решена при проведении крупных мультицентровых исследований с применением методов различной модальности. Большое значение может иметь разработка тестов и заданий для выявления инсайта, более приближенных к реальным условиям и более точно модулирующих решение сложных задач в науке, искусстве и других сферах человеческой деятельности [35]. Кроме того, принципиальное значение имеет разработка объективных и более точных методов регистрации инсайта [65]. В аспекте изучения инсайта остается недостаточно реализованным потенциал методов неинвазивной стимуляции мозга, которые в настоящее время могут применяться с учетом данных индивидуальной структурной и функциональной нейровизуализации, а также текущей нейрональной активности в режиме реального времени. Применение неинвазивной стимуляции мозга может способствовать установлению каузальной связи между активностью региона мозга и изучаемым феноменом, что существенно дополнит данные, полученные другими методами.

Дальнейшие исследования в этой области могут сыграть большую роль в решении загадки “инсайтного мозга” и улучшении понимания мозговой организации творчества и креативности в целом.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-00-01100(18-00-01078). The reported study was funded by RFBR according to the research project № 18-00-01100(18-00-01078).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бакулин И.С., Пойдашева А.Г., Павлов Н.А. и др. Транскраниальная электрическая стимуляция в

- улучшении функции руки при инсульте // Успехи физиологических наук. 2019. Т. 50. № 1. С. 90–104.  
<https://doi.org/10.1134/S030117981901003X>
2. Бехтерева Н.П., Данько С.Г., Старченко М.Г. и др. Исследование мозговой организации творчества. Сообщение III. Активация мозга по данным локального мозгового кровотока и ЭЭГ // Физиология человека. 2001. Т. 27. № 4. С. 6–14.
  3. Бехтерева Н.П., Старченко М.Г., Ключарев В.А. и др. Изучение мозговой организации творчества. Сообщение 2: Данные позитронно-эмиссионной томографии // Физиология человека. 2000. Т. 26. № 5. С. 11–17.
  4. Владимиров И.Ю., Коровкин С.Ю., Лебедь А.А. и др. Управляющий контроль и интуиция на различных этапах творческого решения // Психологический журнал. 2016. Т. 37. № 1. С. 48–60.
  5. Дункер К. Качественное (экспериментальное и теоретическое) исследование продуктивного мышления // Психология мышления. М., 1965. С. 21–85.
  6. Любарт Т., Муширу К., Торджман С., Зенасни Ф. Психология креативности. М.: “Когнито-Центр”, 2009. 215 с.
  7. Пономарев Я.А. Психология творчества. М.: Наука, 1976. 304 с.
  8. Спиридонов В.Ф., Лифанова С.С. Инсайт и ментальные операторы, или можно ли пошагово решить инсайтную задачу // Психология. Журн. Высшей школы экономики. 2013. Т. 10. № 3. С. 54–63.
  9. Тихомиров О.К. Психология мышления. М.: Издательский центр “Академия”, 2008. 288 с.
  10. Ушаков Д.В. Психология интеллекта и одаренности. М.: Изд-во “Институт психологии РАН”, 2011. 464 с.
  11. Aihara T., Ogawa T., Shimokawa T., Yamashita O. Anodal transcranial direct current stimulation of the right anterior temporal lobe did not significantly affect verbal insight // PLoS One. 2017. V. 12. № 9. <https://doi.org/e0184749>.  
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0184749>
  12. Aldous C.R. Creativity, problem solving and innovative science: Insights from history, cognitive psychology and neuroscience // International Education J. 2007. V. 8. № 2. P. 176–186.
  13. Aziz-Zadeh L., Kaplan J.T., Jacoboni M. “Aha!”: The neural correlates of verbal insight solutions // Human Brain Mapping. 2009. V. 30. № 3. P. 908–916.  
<https://doi.org/10.1002/hbm.20554>
  14. Beaty R.E., Benedek M., Kaufman S.B. et al. Default and executive network coupling supports creative idea production // Science Reports. 2015. V. 5. P. 10964.  
<https://doi.org/10.1038/srep10964>
  15. Beaty R.E., Kenett Y.N., Christensen A.P. et al. Robust prediction of individual creative ability from brain functional connectivity // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2018. V. 115. № 5. P. 1087–1092.  
<https://doi.org/10.1073/pnas.1713532115>
  16. Benedek M. The Neuroscience of Creative Idea Generation. Cham, Switzerland: Springer. 2018.
  17. Benedek M., Jauk E., Fink A. et al. To create or to recall? Neural mechanisms underlying the generation of creative new ideas // NeuroImage. 2014. V. 88. 125–133.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.11.021>
  18. Benn Y., Webb T.L., Chang B.P. et al. The neural basis of monitoring goal progress // Frontiers in Human Neuroscience. 2014. V. 8. P. 688.  
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00688>
  19. Bergmann T.O., Karabanov A., Hartwigsen G. et al. Combining non-invasive transcranial brain stimulation with neuroimaging and electrophysiology: Current approaches and future perspectives // Neuroimage. 2016. V. 140. P. 4–19.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.02.012>
  20. Boccia M., Piccardi L., Palermo L. et al. Where do bright ideas occur in our brain? Meta-analytic evidence from neuroimaging studies of domain specific creativity // Frontiers in Psychology. 2015. V. 6. P. 1195.  
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01195>
  21. Boot N., Baas M., van Gaal S. et al. Creative cognition and dopaminergic modulation of fronto-striatal networks: Integrative review and research agenda // Neurosci. Biobehav. Rev. 2017. V. 78. P. 13–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.007>
  22. Botvinick M.M., Cohen J.D., Carter C.S. Conflict monitoring and anterior cingulate cortex: an update // Trends Cogn. Sci. 2004. V. 8. № 12. P. 539–46.  
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.10.003>
  23. Bowden E.M., Jung-Beeman M., Fleck J. et al. New approaches to demystifying insight // Trends Cogn. Sci. 2005. V. 9. P. 322–328.  
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.05.012>
  24. Bowden E., Jung-Beeman M. Methods for investigating the neural components of insight // Methods. 2007. V. 42. № 1. P. 87–99.  
<https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2006.11.007>
  25. Bressler S.L., Menon V. Large-scale brain networks in cognition: Emerging methods and principles // Trends Cogn. Sci. 2010. V. 14. № 6. P. 277–290.  
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.04.004>
  26. Cauda F., Cavanna A. E., D’Agata F. et al. Functional connectivity and coactivation of the nucleus accumbens: A combined functional connectivity and structure-based meta-analysis // J. Cogn. Neurosci. 2011. V. 23. № 10. P. 2864–2877.  
<https://doi.org/10.1162/jocn.2011.21624>
  27. Cerruti C., Schlaug G. Anodal transcranial direct current stimulation of the prefrontal cortex enhances complex verbal associative thought // J. Cogn. Neurosci. 2009. V. 21. № 10. P. 1980–1987.  
<https://doi.org/10.1162/jocn.2008.21143>
  28. Chen Q., Yang W., Li W. et al. Association of creative achievement with cognitive flexibility by a combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity study // Neuroimage. 2014. V. 102. P. 474–483.  
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.08.008>

29. *Chervyakov A.V., Chernyavsky A.Y., Sinityn D.O., Piradov M.A.* Possible Mechanisms Underlying the Therapeutic Effects of Transcranial Magnetic Stimulation // *Front. Hum. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 303. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00303>
30. *Chi R.P., Snyder A.W.* Brain stimulation enables the solution of an inherently difficult problem // *Neurosci. Lett.* 2012. V. 515. № 2. P. 121–4. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2012.03.012>
31. *Chi R.P., Snyder A.W.* Facilitate insight by non-invasive brain stimulation // *PLoS One.* 2011. V. 6. № 2. e16655. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016655>
32. *Chiarello C., Burgess C., Richards L., Pollock A.* Semantic and associative priming in the cerebral hemispheres: some words do, some words don't . . . sometimes, some places // *Brain Lang.* 1990. V. 38. № 1. P. 75–104. [https://doi.org/10.1016/0093-934x\(90\)90103-n](https://doi.org/10.1016/0093-934x(90)90103-n)
33. *Chrysikou E.G., Weber M.J., Thompson-Schill S.L.* A matched filter hypothesis for cognitive control // *Neuropsychologia.* 2014. V. 62. P. 341–355. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2013.10.021>
34. *Chu Y., MacGregor J.* Human performance on insight problem solving: a review // *J. Probl. Solving.* 2011. V. 3. № 2. P. 119–150. <https://doi.org/10.7771/1932-6246.1094>
35. *Dandan T., Haixue Z., Wenfu L. et al.* Brain activity in using heuristic prototype to solve insightful problems // *Behav. Brain Res.* 2013. V. 253. P. 139–44. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2013.07.017>
36. *Danek A., Fraps T., von Müller A. et al.* Working wonders? Investigating insight with magic tricks // *Cognition.* 2014. V. 130. № 2. P. 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.11.003>
37. *Danko S.G., Starchenko M.G., Bechtereva N.P.* EEG local and spatial synchronization during a test on the insight strategy of solving creative verbal tasks // *Human Physiology.* 2003. V. 29. № 4. P. 502–504. <https://doi.org/10.1023/A:1024950028210>
38. *Demarin V., Bedeković M.R., Purić M.B., Pašić M.B.* Arts, Brain and Cognition // *Psychiatr. Danub.* 2016. V. 28. № 4. P. 343–348.
39. *Dietrich A., Haider H.A.* Neurocognitive Framework for Human Creative Thought // *Front. Psychol.* 2017. V. 7. P. 2078. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.02078>
40. *Dietrich A.* The cognitive neuroscience of creativity // *Psychon. Bull. Rev.* 2004. V. 11. № 6. P. 1011–1026. <https://doi.org/10.3758/BF03196731>
41. *Dietrich A., Kanso R.* A review of EEG, ERP, and neuroimaging studies of creativity and insight // *Psychol. Bull.* 2010. V. 136. № 5. P. 822–848. <https://doi.org/10.1037/a0019749>
42. *Du Boisgueheneuc F., Levy R., Volle E. et al.* Functions of the left superior frontal gyrus in humans: a lesion study // *Brain.* 2006. V. 129. № 12. P. 3315–28. <https://doi.org/10.1093/brain/awl244>
43. *Erickson B., Truelove-Hill M., Oh Y. et al.* Resting-state brain oscillations predict trait-like cognitive styles // *Neuropsychologia.* 2018. V. 120. P. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.09.014>
44. *Fleck J., Weisberg R.* Insight versus analysis: evidence for diverse methods in problem solving // *J. Cogn. Psychol.* 2013. V. 25. № 4. P. 436–463. <https://doi.org/10.1080/20445911.2013.779248>
45. *Goel V., Buchel C., Frith C., Dolan R.J.* Dissociation of mechanisms underlying syllogistic reasoning // *Neuroimage.* 2000. V. 12. № 5. P. 504–14. <https://doi.org/10.1006/nimg.2000.0636>
46. *Goll Y., Atlan G., Citri A.* Attention: The claustrum // *Trends Neurosci.* 2015. V. 38. № 8. P. 486–495. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2015.05.006>
47. *Hao X., Cui S., Li W. et al.* Enhancing insight in scientific problem solving by highlighting the functional features of prototypes: an fMRI study // *Brain Res.* 2013. V. 1534. P. 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2013.08.041>
48. *Hervé P.Y., Zago L., Petit L. et al.* Revisiting human hemispheric specialization with neuroimaging // *Trends Cogn. Sci.* 2013. V. 17. № 2. P. 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2012.12.004>
49. *Hoppe K.D.* Hemispheric specialization and creativity // *Psychiatric Clin. N. Amer.* 1988. V. 11. P. 303–15. [https://doi.org/10.1016/S0193-953X\(18\)30482-9](https://doi.org/10.1016/S0193-953X(18)30482-9)
50. *Hutsler J., Galuske R.A.* Hemispheric asymmetries in cerebral cortical networks // *Trends Neurosci.* 2003. V. 26. № 8. P. 429–35. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(03\)00198-X](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(03)00198-X)
51. *Iturria-Medina Y., Pérez Fernández A., Morris D.M. et al.* Brain hemispheric structural efficiency and interconnectivity rightward asymmetry in human and nonhuman primates // *Cereb. Cortex.* 2011. V. 21. № 1. P. 56–67. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq058>
52. *Jarman M.S.* Quantifying the qualitative: Measuring the insight experience // *Creativity Research Journal.* 2014. V. 26. № 3. P. 276–288. <https://doi.org/10.1080/10400419.2014.929405>
53. *Jauk E., Neubauer A.C., Dunst B. et al.* M. Gray matter correlates of creative potential: A latent variable voxel-based morphometry study // *Neuroimage.* 2015. V. 111. P. 312–320. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.02.002>
54. *Jensen O., Mazaheri A.* Shaping functional architecture by oscillatory alpha activity: gating by inhibition // *Front. Hum. Neurosci.* 2010. V. 4. P. 186. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2010.00186>
55. *Jung-Beeman M.* Bilateral brain processes for comprehending natural language // *Trends Cogn. Sci.* 2005. V. 9. № 11. P. 512–518. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2005.09.009>
56. *Jung-Beeman M., Bowden E.M., Haberman J. et al.* Neural activity when people solve verbal problems with insight // *PLoS Biol.* 2004. V. 2. № 4. E 97. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0020097>

57. *Kapur N.* Paradoxical functional facilitation in brain-behaviour research. A critical review // *Brain*. 1996. V. 119. Pt. 5. P. 1775–90. <https://doi.org/10.1093/brain/119.5.1775>
58. *Kershaw T.C., Ohlsson S.* Multiple causes of difficulty in insight: the case of the nine-dot problem // *J. Exp. Psychol. Learn.* 2004. V. 30. № 1. P. 3–13. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.30.1.3>
59. *Kizilirmak J. M., Gomes da Silva J. G., Imamoglu F. et al.* Generation and the subjective feeling of “aha!” are independently related to learning from insight // *Psychological Research*. 2016. V. 80. № 6. P. 1059–1074. <https://doi.org/10.1007/s00426-015-0697-2>
60. *Kounios J., Beeman M.* The cognitive neuroscience of insight // *Annu. Rev. Psychol.* 2014. V. 65. P. 71–93. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-010213-115154>
61. *Kounios J., Fleck J.I., Green D.L. et al.* The origins of insight in resting-state brain activity // *Neuropsychologia*. 2008. V. 46. № 1. P. 281–91. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.07.013>
62. *Kounios J., Frymiare J.L., Bowden E.M. et al.* The prepared mind: Neural activity prior to problem presentation predicts subsequent solution by sudden insight // *Psychol. Sci.* 2006. V. 17. № 10. P. 882–90. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01798.x>
63. *Kurada L., Bayat A., Joshi S.* The Claustrum in Relation to Seizures and Electrical Stimulation // *Front. Neuroanat.* 2019. V. 12. № 13. P. 8. <https://doi.org/10.3389/fnana.2019.00008>
64. *Lau E.F., Phillips C., Poeppel D.* A cortical network for semantics: (De)constructing the N400 // *Nature Reviews Neuroscience* 2008. V. 9. P. 920–933. <https://doi.org/10.1038/nrn2532>
65. *Laukkonen R.E., Tangen J.M.* How to Detect Insight Moments in Problem Solving Experiments // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. P. 282. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00282>
66. *Lin J., Cui X., Dai X. et al.* Neural correlates of creative insight: Amplitude of low-frequency fluctuation of resting-state brain activity predicts creative insight // *PLoS One*. 2018. V. 13. № 8. P. e0203071. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203071>
67. *Luo J., Li W., Fink A. et al.* The time course of breaking mental sets and forming novel associations in insight-like problem solving: An ERP investigation // *Experimental Brain Research* 2011. V. 212. № 4. P. 583–591. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2761-5>
68. *Luo J., Niki K., Phillips S.* Neural correlates of the “Aha! reaction” // *Neuroreport*. 2004. V. 15. № 13. P. 2013–2017. <https://doi.org/10.1097/00001756-200409150-00004>
69. *Mai X.Q., Luo J., Wu J.H. et al.* “Aha!” effects in a guessing riddle task: An event-related potential study // *Human Brain Mapping*. 2004. V. 22. № 4. P. 261–270. <https://doi.org/10.1002/hbm.20030>
70. *Mednick S.A.* The associative basis of the creative process // *Psychological Review* 1962. V. 69. № 3. P. 220–232. <https://doi.org/10.1037/h0048850>
71. *Metcalfe J., Wiebe D.* Intuition in insight and noninsight problem solving // *Mem. Cogn.* 1987. V. 15. № 3. P. 238–246. <https://doi.org/10.3758/BF03197722>
72. *Metuki N., Sela T., Lavidor M.* Enhancing cognitive control components of insight problems solving by anodal tDCS of the left dorsolateral prefrontal cortex // *Brain Stimulation*. 2012. V. 5. № 2. P. 110–115. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2012.03.002>
73. *Miller B.L., Cummings J., Mishkin F. et al.* Emergence of artistic talent in frontotemporal dementia // *Neurology*. 1998. V. 51. P. 978–982. <https://doi.org/10.1212/WNL.51.4.978>
74. *Miller E.K., Cohen J.D.* An integrative theory of prefrontal cortex function // *Annual Review of Neuroscience*. 2001. V. 24. P. 167–202. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.24.1.167>
75. *Miller L.A., Tippett L.J.* Effects of focal brain lesions on visual problem-solving // *Neuropsychologia*. 1996. V. 34. № 5. P. 387–98. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(95\)00116-6](https://doi.org/10.1016/0028-3932(95)00116-6)
76. *Mumford M.D., Whetzel D.L.* Insight, creativity, and cognition: On Sternberg and Davidson’s the nature of insight // *Creativity Research Journal*. 1996. V. 9. № 1. P. 103–107. [https://doi.org/10.1207/s15326934crj0901\\_10](https://doi.org/10.1207/s15326934crj0901_10)
77. *Nieuwenhuys R.* The insular cortex: A review // *Progress in Brain Research*. 2012. V. 195. P. 123–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53860-4.00007-6>
78. *Novick L.R., Sherman S.J.* On the nature of insight solutions: Evidence from skill differences in anagram solution // *The Quarterly J. Experimental Psychology*. 2003. V. 56. № 2. P. 351–382. <https://doi.org/10.1080/02724980244000288>
79. *Ogawa T., Aihara T., Shimokawa T. et al.* Large-scale brain network associated with creative insight: combined voxel-based morphometry and resting-state functional connectivity analyses // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. № 1. P. 6477. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24981-0>
80. *Oh A., Duerden E.G., Pang E.W.* The role of the insula in speech and language processing // *Brain and Language*. 2014. V. 135. P. 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2014.06.003>
81. *Ovington L.A., Saliba A.J., Moran C.C. et al.* Do people really have insights in the shower? The when, where and who of the aha! Moment // *J. Creative Behavior*. 2015. V. 52. № 1. P. 21–34. <https://doi.org/10.1002/jocb.126>
82. *Qiu J., Li H., Jou J. et al.* Neural correlates of the “Aha” experiences: evidence from an fMRI study of insight problem solving // *Cortex*. 2010. V. 46. № 3. P. 397–403. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.06.006>
83. *Qiu J., Li H., Jou J. et al.* Spatiotemporal cortical activation underlying the mental preparation of successful riddles solving: an Event-Related Potential Study // *Experimental Brain Research*. 2008. V. 186. № 4. P. 629–34. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1270-7>

84. *Qiu J., Li H., Luo Y. et al.* Brain mechanism of cognitive conflict in a guessing Chinese logograph task // *Neuroreport*. 2006. V. 17. № 6. P. 679–682. <https://doi.org/10.1097/00001756-200604240-00025>
85. *Razumnikova O.M.* Creativity related cortex activity in the remote associates task // *Brain Research Bulletin*. 2007. V. 73. № 1–3. P. 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2007.02.008>
86. *Reverberi C., Toraldo A., D'Agostini S. et al.* Better without (lateral) frontal cortex? Insight problems solved by frontal patients // *Brain*. 2005. V. 128. № 12. P. 2882–90. <https://doi.org/10.1093/brain/awh577>
87. *Rosen A., Reiner M.* Right frontal gamma and beta band enhancement while solving a spatial puzzle with insight // *Int. J. Psychophysiol.* 2017. V. 122. P. 50–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2016.09.008>
88. *Sandkühler S., Bhattacharya J.* Deconstructing insight: EEG correlates of insightful problem solving // *PLoS One*. 2008. V. 3. № 1. P. e1459. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0001459>
89. *Sandrini M., Umiltà C., Rusconi E.* The use of transcranial magnetic stimulation in cognitive neuroscience: a new synthesis of methodological issues // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2011. V. 35. № 3. P. 516–36. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2010.06.005>
90. *Sheth B.R., Sandkühler S., Bhattacharya J.* Posterior Beta and anterior gamma oscillations predict cognitive insight // *J. Cogn. Neurosci.* 2009. V. 21. № 7. P. 1269–79. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21069>
91. *Sliwinska M.W., Vitello S., Devlin J.T.* Transcranial magnetic stimulation for investigating causal brain-behavioral relationships and their time course // *J. Vis. Exp.* 2014. № 89. P. e51735. <https://doi.org/10.3791/51735>
92. *Sprugnoli G., Rossi S., Emmendorfer A. et al.* Neural correlates of Eureka moment // *Intelligence*. 2017. V. 62. P. 99–118. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.03.004>
93. *Sridharan D., Levitin D.J., Menon V.* A critical role for the right fronto-insular cortex in switching between central-executive and default-mode networks // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2008. V. 105. № 34. P. 12569–12574. <https://doi.org/10.1073/pnas.0800005105>
94. *Stagg C.J., Antal A., Nitsche M.A.* Physiology of transcranial direct current stimulation // *J. ECT*. 2018. V. 34. № 3. P. 144–152. <https://doi.org/10.1097/YCT.0000000000000510>
95. *Subramaniam K., Kounios J., Parrish T.B. et al.* A brain mechanism for facilitation of insight by positive affect // *J. Cognitive Neuroscience*. 2009. V. 21. № 3. P. 415–32. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21057>
96. *Takeuchi H., Taki Y., Sassa Y. et al.* Regional gray matter volume of dopaminergic system associate with creativity: Evidence from voxel-based morphometry // *Neuroimage*. 2010. V. 51. № 2. P. 578–585. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.078>
97. *Tik M., Sladky R., Luft C.D.B. et al.* Ultra-high-field fMRI insights on insight: Neural correlates of the Aha!-moment // *Hum. Brain. Mapp.* 2018. V. 39. № 8. P. 3241–3252. <https://doi.org/10.1002/hbm.24073>
98. *Touroutoglou A., Hollenbeck M., Dickerson B.C. et al.* Dissociable large-scale networks anchored in the right anterior insula subserve affective experience and attention // *Neuroimage*. 2012. V. 60. № 1. P. 1947–1958. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.012>
99. *Valero-Cabré A., Amengual J.L., Stengel C. et al.* Transcranial magnetic stimulation in basic and clinical neuroscience: A comprehensive review of fundamental principles and novel insights // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. V. 83. P. 381–404. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2018.07.002>
100. *Vandenberghe R., Price C., Wise R. et al.* Functional anatomy of a common semantic system for words and pictures // *Nature*. 1996. V. 383. P. 254–256. <https://doi.org/10.1038/383254a0>
101. *Wang T., Zhang Q., Li H. et al.* The time course of Chinese riddles solving: Evidence from an ERP study // *Behavioural Brain Research*. 2009. V. 199. № 2. P. 278–282. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2008.12.002>
102. *Webb M.E., Little D.R., Cropper S.J.* Once more with feeling: Normative data for the aha experience in insight and noninsight problems // *Behav. Res. Methods*. 2018. V. 50. № 5. P. 2035–2056. <https://doi.org/10.3758/s13428-017-0972-9>
103. *Wu Y.C., Jung M., Lock D. et al.* Resting state and task-related brain dynamics supporting insight // *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* 2014. V. 2014. P. 5454–7. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2014.6944860>
104. *Yin J., Gao Z., Jin X. et al.* The neural mechanisms of percept-memory comparison in visual working memory // *Biological Psychology*. 2012. V. 90. P. 71–79. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2012.02.023>
105. *Zhang M., Tian F., Wu X. et al.* The neural correlates of insight in Chinese verbal problems: an event related-potential study // *Brain Res. Bull.* 2011. V. 84. № 3. P. 210–214. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2011.01.001>
106. *Zhao Q., Li Y., Shang X. et al.* Uniformity and nonuniformity of neural activities correlated to different insight problem solving // *Neuroscience*. 2014. V. 270. P. 203–211. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2014.04.017>
107. *Zhao Q., Zhou Z., Xu H. et al.* Dynamic neural network of insight: a functional magnetic resonance imaging study on solving Chinese 'chengyu' riddles // *PLoS One*. 2013. V. 8. № 3. e59351. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059351>
108. *Zhao Q., Zhou Z., Xu H. et al.* Neural pathway in the right hemisphere underlies verbal insight problem solving // *Neuroscience*. 2014. V. 256. P. 334–41. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2013.10.019>
109. *Zmigrod S., Colzato L.S., Hommel B.* Stimulating creativity: modulation of convergent and divergent thinking by transcranial direct current stimulation (tDCS) // *Creat. Res. J.* 2015. V. 27. P. 353–360. <https://doi.org/10.1080/10400419.2015.1087280>

## Neurobiological Principles of Insight Problem Solving

I. S. Bakulin<sup>1</sup>, A. G. Poydasheva<sup>1, \*</sup>, A. A. Medyntsev<sup>2</sup>, D. Yu. Lagoda<sup>1</sup>, E. I. Kremneva<sup>1</sup>,  
L. A. Legostaeva<sup>1</sup>, D. O. Sinitsyn<sup>1</sup>, N. A. Suponeva<sup>1</sup>, and M. A. Piradov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Research Center of Neurology, 125367 Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Institute of Psychology RAS, 129366 Moscow, Russia*

*\*e-mail: alexandra.poydasheva@gmail.com*

Received June 11, 2019; revised October 4, 2019; accepted October 5, 2019

Insight is the sudden and unpredictable appearance of a problem's solution. This is one of the intensively studied phenomena associated with creative thinking and creativity. This paper analyzes the results of the researches on the insight's neurobiological principles using neuroimaging and neurophysiological methods. Here we discuss the approaches to the insight definition and the tasks that are used for its identification. The role of the various brain structures and neuronal networks that has potential contribution in the insight at the different stages of the task solution is considered. The characteristics of the underlying brain activity associated with the insight are also separately discussed. Particular attention is paid to research with non-invasive brain stimulation, which can be used to modulate the frequency of insight solutions and clarify the role of various brain structures in the insight.

**Keywords:** insight, creativity, functional MRI, EEG, evoked potentials, noninvasive brain stimulation, transcranial direct current stimulation, neuromodulation, neuroimaging