

УДК 612.821+612.83+616.74

## КОГНИТИВНАЯ ДВИГАТЕЛЬНАЯ РЕАБИЛИТАЦИЯ: ВООБРАЖЕНИЕ И НАБЛЮДЕНИЕ МОТОРНЫХ ДЕЙСТВИЙ

© 2020 г. Ю. К. Столбков<sup>1</sup>, Ю. П. Герасименко<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>ФГБУН Институт физиологии имени И.П. Павлова РАН, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: [gerasimenko@infran.ru](mailto:gerasimenko@infran.ru)

Поступила в редакцию 15.01.2020 г.

После доработки 10.05.2020 г.

Принята к публикации 15.07.2020 г.

Реабилитацию движений можно рассматривать как процесс обучения, при котором утраченные навыки следует восстановить, а новые – приобрести на базе физической тренировки. Но всегда ли физические упражнения необходимы для реализации этих целей? Многими авторами показано, что воображение и наблюдение моторных действий приводят к активации тех же областей мозга, что и их физические аналоги, и, что они могут вызывать такие же пластические изменения в моторной системе, что и реальная физическая тренировка. В обзоре представлены данные о применении воображения и наблюдения моторных действий как замены физического действия в двигательной реабилитации, об общности их нейронных субстратов, а также о поведенческом и нейрофизиологическом использовании этих методов у здоровых людей и в клинической практике.

*Ключевые слова:* движения, моторные действия, обучение, реабилитация, моторные образы, воображение движения, наблюдение действия.

**DOI:** 10.31857/S0131164620060119

Можно ли научиться выполнять реальное движение (или моторное действие) выполняя его мысленно или наблюдая за его выполнением? Ответ на этот вопрос важен не только с теоретической точки зрения, он имеет и клиническое значение: когда пациенты не способны или не имеют возможности двигаться, они могли бы тренироваться ментально, чтобы предотвратить нежелательные церебральные изменения, возникающие в результате бездействия и неиспользования конечностей, и, кроме того, такие тренировки могли бы играть роль дополнительного инструмента в моторном обучении [1].

“В области человеческой моторной когниции только недавно было осознано, что действия содержат скрытую стадию. Этой стадией является – представление, которое включает в себя цель действия, средства его достижения, его последствия для организма и внешнего мира” [2]. В соответствии с этим постулатом, воображение и наблюдение действия – это ментальные состояния, которые по своему контенту (совокупности операций, необходимых для их реализации) и структуре (набору областей головного мозга, участвующих в их формировании) аналогичны реальному действию.

Существуют убедительные доказательства того, что наблюдение действия, выполняемого дру-

гими людьми и моторные образы (воображаемые движения) могут повысить эффективность моторной тренировки и/или моторного восстановления [3–8]. Исследователи полагают, что эти положительные влияния связаны с тем, что наблюдение и воображение действия активируют те же нейронные субстраты, которые активируются и при физическом выполнении того же действия [2, 9, 10].

### Моторные образы (воображаемые движения)

*Ментальная тренировка.* Моторные образы – это когнитивный процесс, при котором человек воображает, что он выполняет движение (действие), не совершая его физически; это динамическое состояние, во время которого представление моторного действия внутренне активируется без какого-либо моторного выхода [1]. Моторный образ [11], воображаемое движение [4], мысленное представление движения или мысленный образ движения [12] – это разные названия одного и того же феномена, который рассматривают как мысленную имитацию реального (физического) движения [13]. Совпадения их многих поведенческих и нейрофизиологических характеристик привели к понятию функциональной эквивалентности реальных и воображаемых движений [14].

Ментальная тренировка с помощью воображения движений – это процесс, при котором человек повторно мысленно выполняет движения, для совершенствования их физического исполнения [15]. Это – один из методов приобретения и закрепления моторных навыков [11], который улучшает различные элементы моторного поведения [16]. Однако ее эффективность ниже, чем эффективность физической тренировки [17].

Воображение движения – это и элемент терапевтической техники, метода, при котором воображение движения неоднократно повторяется с целью реабилитации двигательных функций [18]. Это безопасная и недорогая техника, которая может быть использована самим пациентом без наблюдения со стороны врача [15]. Ее можно использовать как дополнение к физическим тренировкам или как их замену, когда двигательные возможности пациента ограничены [19]. Результаты применения этого метода обнадеживают [14, 20], однако его клиническую эффективность все еще следует интерпретировать с осторожностью [15, 21]. Хотя эффективность ментальной тренировки ниже эффективности физической, их сочетание дает больший эффект при моторном обучении и реабилитации, чем их раздельное применение [19].

Теоретическая база ментальных тренировок – данные о функциональной эквивалентности реальных и воображаемых движений [14, 18].

*Пластические изменения.* Стратегии двигательной реабилитации базируются на концепции пластичности центральной нервной системы (ЦНС), которой способствует ранняя, интенсивная и целенаправленная терапия [22]. Предполагается, что воображение движения приводит к стимуляции моторных областей головного мозга и тем самым содействует их адаптивным модификациям [21, 23]. Тренировка с использованием воображения движения вызывает изменения в корковых моторных областях, аналогичные тем, которые возникают в результате физической тренировки [24]. Нейропластичность, инициируемая ментальной тренировкой и дающая возможность улучшения качества моторных действий, показана с помощью томографии у здоровых людей [25]. Данные, полученные с помощью транскраниальной магнитной стимуляции, указывают на функциональную связь между кортикальной реорганизацией и изменением двигательного поведения [25].

Паттерны активности структур головного мозга при воображении и выполнении реальных движений у пациентов с инсультом, болезнью Паркинсона, с травмами спинного мозга и с ампутацией конечностей отличаются от паттернов здоровых людей, однако функциональная эквивалентность между воображаемыми и реальными

движениями сохраняется [18]. Кроме того у пациентов этих клинических популяций ментальные тренировки сопровождаются повышением способности воображать движения [18].

В отношении пластических изменений, вызванных ментальными тренировками, следует обратить внимание на результаты в работах [26, 27]. Согласно [26], ментальная тренировка “буквально обращала вспять” кортикальную реорганизацию, вызванную ампутацией. Аналогичный результат наблюдали и [27], проводившие ментальную тренировку у больных с травмами спинного мозга.

*Поведенческие и нейрофизиологические данные.* Способность мысленно выполнять движения появляется в пятилетнем возрасте [28], совершенствуется в подростковом и в период раннего совершеннолетия [29], но ухудшается с годами. Она ослабевает в меньшей степени для простых, чем для сложных движений, а ослабление менее значительно для повседневных двигательных актов, чем для проб, используемых в лабораторных исследованиях [30]. Люди отличаются друг от друга по способности воображать двигательные акты [31]. Эта способность повышается в результате ментальной или физической тренировок и понижается в результате утраты или неупотребления конечностей [32].

Согласно работе [31], паттерны церебральной активности у молодых людей с низкой и высокой способностью воображать локомоцию отличались друг от друга. Они отличались также у новичков и профессиональных атлетов при воображении одного и того же двигательного акта, а ментальная тренировка способствовала устранению этого различия [33].

Воображение движения может быть выполнено либо от первого, либо от третьего лица. В первом случае, человек мысленно воспроизводит то, что он видел (или ощущал), когда выполнял движение сам. Во втором – человек выступает в роли наблюдателя: мысленно видит того, кто выполняет заданное движение, независимо от того, видит он себя самого или другого человека [34].

Воображаемые движения от первого лица, имеют большую функциональную эквивалентность с реальными движениями, чем движения, сформированные от третьего лица [35]. Кинестетические моторные образы (т.е. воображаемые движения, сформированные на базе мысленного воспроизведения кинестетических ощущений, сопровождающих реальное движение) активируют моторные области головного мозга в большей степени, чем зрительные образы (т.е. воображаемые движения, базирующиеся на мысленной визуализации движений) [36]. Кинестетический моторный образ движений нижних конечностей,

в отличие от зрительного, влияет на параметры постуральной активности [37].

Активность вегетативной нервной системы изменяется при воображении движения и эти изменения аналогичны наблюдаемым при физическом исполнении такого же движения (хотя они более слабо выражены) [38]. Поэтому вегетативные показатели можно использовать для контроля процесса воображения движений [39].

При воображении движения изменяется и электроэнцефалографическая активность. В частности, наблюдается десинхронизация сенсорно-моторного ритма ( $\mu$ -ритма) в корковых представлениях конечности, выполняющей движение [4, 40], а также конечности, движение которой воображается [40].

Противоречивость результатов работ, в которых оценивали влияние воображения движения на спинальные мотонейроны, возможно, связана с тем, что для выявления этих влияний следует выполнить ряд условий. Во-первых, необходим контроль в реальном времени качества исполнения задачи на воображение. Во-вторых, нужна оценка “яркости” воображаемых движений – индикатора способности человека воображать движения (тем более что показано: чем больше “яркость” моторного образа, тем больше кортико-спинальная фасилитация [41]). Поэтому отрицательный (в отношении влияния на мотонейроны) результат может быть просто следствием слабой кортико-спинальной фасилитации, вызываемой воображением движения в обследованной группе людей. В-третьих, воображение движения – это динамический процесс [33, 40]. Следовательно, результат тестирования зависит от момента времени, когда прикладывают тестирующий стимул. В-четвертых, воображение движения – процесс, реализуемый с помощью рабочей памяти [42, 43]. Поэтому результат тестирования зависит и от интервала между реальным и мысленным выполнением движения. Следует отметить, что эти предположения, о необходимых условиях, непосредственно вытекают из сравнения работ [39, 40, 44, 45], авторы одной из которых [44] не обнаружили влияния воображения движений на спинальные мотонейроны.

### Наблюдение моторного действия

*Зеркальные нейроны.* Нейроны, которые разряжаются как при выполнении моторного акта, так и при наблюдении за тем, как другие выполняют его, называют “зеркальными нейронами” [46–48]. Они были обнаружены у макак в вентральной премоторной области  $F_5$  и среди нейронов нижних парietальных долек, а сеть, содержащая эти нейроны, была названа “зеркальной нейронной системой” [49]. Однако, согласно [9], было пока-

зано, что и нейроны в дорсальной премоторной коре, в дополнительной моторной области, в первичной моторной коре, в верхних и средних теменных, во внутривариетальных и теменно-затылочных областях коры могут отвечать как на наблюдение, так и на выполнение действия. Более широкую сеть нейронов, участвующих в наблюдении действия, иногда называют сетью наблюдения действия [9].

Из-за инвазивности регистраций активности отдельных нейронов, прямых доказательств наличия зеркальных нейронов в головном мозге человека очень мало. В подавляющем большинстве исследований (за исключением работы [50]) для их обнаружения использовали косвенные методы: функциональную магнитно-резонансную томографию (фМРТ), ЭЭГ и транскраниальную магнитную стимуляцию (ТМС). Однако есть множество свидетельств того, что простое наблюдение движения вызывает изменения в моторной системе человека и этот феномен принимают в качестве доказательства некоей формы сопряжения наблюдения и исполнения действия в головном мозге человека [51].

*R. Mukamel et al.* [50] регистрировали активность одиночных нейронов в медиальных лобных и височных областях коры, в то время как пациенты брали руками различные предметы или наблюдали за такими же действиями других пациентов. Значительная доля нейронов в дополнительной моторной области, а также в гиппокампе, отвечали как на наблюдение, так и на выполнение таких действий. Подгруппа этих нейронов показала активацию во время выполнения действия и торможение во время его наблюдения [50].

Наблюдение действия рекрутирует представления, которые возникают благодаря автоматическим визуо-моторным преобразованиям, называемым почти взаимозаменяемо “моторная имитация”, “моторный резонанс” или “зеркальный механизм” [52]. Зеркальный механизм характеризуют как “...механизм, который трансформирует сенсорные представления действий других в моторные представления тех же действий в головном мозге наблюдателя” [53]. “...всякий раз, когда люди наблюдают действие, совершаемое кем-то другим, в их моторной системе активируется набор нейронов, обеспечивающих наблюдаемое действие” [54].

*Поведенческие и нейрофизиологические данные.* Согласно [51], наблюдение действия вызывает раннее неспецифическое облегчение кортико-спинальной возбудимости (примерно через 90 мс от начала наблюдения) с последующей более поздней модуляцией активности, специфичной для мышц, участвующих в наблюдаемом действии (после 200 мс).

Набор моторных областей, активируемых при наблюдении действий, зависит от их сложности [55] и индивидуального моторного опыта наблюдателя [56]. Наблюдение сложного действия вовлекает большее число областей, чем наблюдение простого [55]. На церебральную активацию может влиять и тип наблюдаемого действия: более высокая активация обнаружена во время переходных действий, чем во время непереходных [57]. Знакомство с моторными действиями, определяемое тем, как часто они выполняются или наблюдаются, увеличивает рекрутирование зеркальных нейронов не только во время переходных [56], но также и во время непереходных движений [58].

Наблюдение действий, выполняемых разными эффекторами, активирует разные области премоторной и теменной коры [59]. Следовательно, связанный с эффектором паттерн соматотопической активации присутствует не только во время физического выполнения и воображения движения, но также и во время его наблюдения.

Первые результаты исследований на обезьянах показали, что зеркальные нейроны реагируют только на наблюдение и выполнение объектно-ориентированных действий, но не на наблюдение бесцельных движений или на действия, выполняемые с помощью инструментов [60]. Однако, согласно [9], данные об активности зеркальных нейронов у этих животных, полученные позже, показали: присутствие объекта не обязательно; действия, выполняемые с помощью инструментов, влияют на зеркальные нейроны; наблюдение за бесцельными, не направленными на объект движениями передних конечностей также эффективно. Кроме того, согласно [61], хотя считалось, что только наблюдения за действиями биологических объектов активируют сеть зеркальных нейронов, более поздние работы показали ее чувствительность и к наблюдению действий небиологических объектов.

Наблюдение действия от первого лица вызывает более сильную активацию церебральных областей, чем наблюдение от третьего лица [62]. При наблюдении действия от первого лица также происходит и самое сильное подавление  $\mu$ -ритма [63]. О значимой  $\mu$ -десинхронизации во время наблюдения действия говорится в работе [64].

*Наблюдательное обучение.* Наблюдение за действием, совершаемым другим человеком для освоения нового движения — обычная практика во взрослой жизни, например, в спорте, это распространенная процедура при развитии двигательных навыков в детском возрасте [65].

На основании существующих экспериментальных данных можно утверждать, что наблюдение действия можно рассматривать как своего рода моторный прайминг, так как оно может об-

легчить выполнение наблюдателем такого же движения (действия) [1]. Наблюдение действия — это метод, который облегчает возникновение нейронной пластичности посредством активации зеркальной нейронной системы [66].

Добровольцы, которые наблюдали за человеком обучающимся двигаться в необычной силовой среде, показали значимо лучшие результаты при последующем тестировании в такой же среде, чем те, которые не наблюдали действий в необычных условиях [67]. Тренировка проприоцептивной чувствительности улучшала результаты последующего наблюдательного обучения, что свидетельствует об участии соматосенсорной системы в таком обучении [68]. По мнению [2], наблюдение действия автоматически запускает его ментальную имитацию, и поэтому облегчает последующее выполнение реального действия.

На моторную систему можно воздействовать не только визуальными, но и другими сигналами, связанными с действием. У людей моторное облегчение при наблюдении действия повышалось, когда слуховые и визуальные сигналы, связанные с действием, предъявлялись одновременно [69]. Эти результаты указывают на возможность сочетания визуальной информации со слуховыми сигналами в реабилитационных протоколах для увеличения положительного эффекта тренировок, базирующихся на наблюдении действия [65].

*Результаты применения наблюдения действий в клинической практике.* Новый подход в реабилитации, известный как терапия с помощью наблюдения действия (или как наблюдательная терапия), использует в своих интересах зеркальный механизм для коррекции двигательных нарушений [66, 70, 71]. Во время одного типичного сеанса пациенты наблюдают повседневное действие и затем выполняют (или пытаются выполнить) его [70]. До настоящего времени этот подход был успешно применен при реабилитации моторных функций верхних конечностей у пациентов с инсультом, при моторном восстановлении пациентов с болезнью Паркинсона и у детей с церебральным параличом; этот подход улучшал также моторные функции нижних конечностей у постоперационных ортопедических пациентов [70].

Результаты применения наблюдательной терапии в двадцати рандомизированных контролируемых исследованиях показали, что большинство этих исследований предполагает эффективность наблюдательной терапии как дополнения к обычной физиотерапии для улучшения восстановления двигательной функции у людей с неврологическими и ортопедическими заболеваниями [71]. На основании анализа 12 рандомизированных контролируемых исследований представлены доказательства того, что наблюдение действия полезно для улучшения двигательной функции

верхних конечностей и независимости от посторонней помощи в повседневной жизни у людей с инсультом [66].

*G. Buccino et al.* [72] выполнили рандомизированное контролируемое исследование, в котором участвовали 18 детей с церебральным параличом: 11 смотрели видеоклипы, демонстрирующие моторные действия (наблюдательная терапия), а 7 – видеоклипы, в которых не было моторных действий (контрольная группа). По сравнению с контролем, дети, получившие наблюдательную терапию, значимо улучшили показатели функции верхних конечностей сразу после лечения, и это улучшение сохранялось через два месяца после лечения. Двенадцать из 18 детей прошли также функциональное магнитно-резонансное обследование перед лечением и сразу после него. По сравнению с контрольной группой, у детей с наблюдательной терапией сразу после лечения была более сильная активация в парието-премоторной сети при взаимодействии между рукой и объектом. Результаты подтверждают, что такая терапия способствует реорганизации церебральных сетей [72].

#### **Общий нейрофизиологический субстрат наблюдения, воображения и физического выполнения движения (действия)**

Как уже отмечалось в предыдущих разделах, ментальная тренировка и наблюдательная терапия базируются на данных, согласно которым наблюдение, воображение и физическое исполнение одного и того же движения (или моторного действия) вызывают очень похожие церебральные активации. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты мета-анализов, выполненных разными авторами.

В мета-анализе [73] было показано, что аналогичные группы церебральных областей активируются в трех различных ситуациях (при наблюдении, воображении и физическом исполнении одного и того же движения (действия)), что подкрепляет гипотезу о функциональной эквивалентности наблюдения, воображения и физического выполнения одних и тех же действий. Однако *эта эквивалентность не является строгой*, если принять во внимание неполное совпадение областей в разных группах [73]. Результаты мета-анализов, выполненных позже [74–77], в основном, подтвердили эти выводы.

Мета-анализы обладают большей статистической мощностью, чем отдельные исследования, так как они допускают объединение данных нескольких работ [76]. Проблема связана с разнообразием двигательных задач в различных исследованиях, которые варьируют от очень простых движений до сложных моторных действий [76]. Проблема даже шире,

так как простые движения обычно используют в случае их физической реализации (из-за ограничений в сканере томографа), тогда как более сложные моторные действия – при их воображении и наблюдении [78]. Кроме того результаты мета-анализов зависят и от критериев отбора работ, включаемых в анализ. Поэтому вывод на базе результатов мета-анализов о существовании комплексов (групп) церебральных областей, одинаковых для воображения, наблюдения и физического выполнения, вовсе не означает, что состав этих комплексов всегда будет одним и тем же, например, при выполнении разных задач. Об этом свидетельствуют, в частности, данные авторов исследования [76], которые сначала выполнили общий мета-анализ 75 работ, изучавших воображение движений, а затем провели дополнительные мета-анализы этих работ с использованием разных критериев включения. Оказалось, что области мозга, активируемые при воображении движения, зависят от типа движения, которое нужно вообразить (простое или сложное), модальности образа (кинестетический или визуальный), эффектора (части тела, участвующей в движении) и инструкции, данной испытуемым [76]. Поэтому мета-аналитическая информация о составе комплексов областей, активирующихся во всех трех обсуждаемых ситуациях, справедлива лишь для некоего “среднего человека”, “среднего эффектора”, “среднего движения” и т.д. Такой информации явно недостаточно клиницисту, для адекватного выбора между различными видами воздействий (между наблюдением, воображением, физическим исполнением) в случае конкретных моторных нарушений. Тем более, что на сегодняшний день лишь в двух (!) исследованиях, оценивавших активность всего головного мозга, данные о церебральной активности во всех трех ситуациях, при выполнении одних и тех же задач, были получены на одних и тех же людях [10, 79].

*F. Filimon et al.* [79] в исследовании на 16 здоровых добровольцах изучали корковые представления физического, наблюдаемого и воображаемого переноса кисти руки (из положения “на груди”) в определенное место в пространстве, задаваемое положением изображений абстрактных фигур, касаться которых не следовало. При “наблюдении движения” использовали видеоклипы правой руки человека, тянущейся к тем же фигурам. Авторы обнаружили церебральные активации, общие для всех трех моторных задач, но, кроме того, сообщили, что активации, при наблюдении движения руки, в их работе отличались от известных из литературы активаций при движениях, связанных с взаимодействиями рук и объектов. Поэтому было сделано заключение о том, что ответы зеркальной нейронной системы специфичны для типа действия, выполняемого рукой [79].

В статье *F. Filimon et al.* [9] представили результаты нового анализа данных, уже опубликован-

ных в 2007 г. С помощью, так называемого, мульти-воксельного анализа паттернов активации они показали, что церебральные представительства, общие для наблюдаемого, воображаемого и физического движения кисти руки, распределены как по дорсальным, так и по вентральным премоторным и теменным областям коры головного мозга, а в областях, совместно активируемых во всех трех ситуациях, возможна идентификация задачи, вызвавшей активацию.

*P. Simos et al.* [10] использовали фМРТ для оценки активаций областей головного мозга у здоровых молодых людей во время физического выполнения, наблюдения и воображения (от 1-го лица) визуально управляемого отслеживания указательным пальцем правой руки сторон невидимого равностороннего треугольника, который был вырезан на доске, позиционированной на груди испытуемого, и которую он не мог видеть. При физическом выполнении действия, испытуемый должен был обвести указательным пальцем ту сторону этого треугольника, о которой сигнализировало световое пятно, вспыхивающее на экране в одном из трех положений, соответствующих вершинам также невидимого равностороннего треугольника. При выполнении задачи на воображение, испытуемые должны были мысленно перемещать указательный палец к вершинам треугольника, о положении которых сигнализировали вспышки света на экране. При выполнении задачи по наблюдению действия испытуемые смотрели (не перемещая глаз и пальца), как изображение кисти руки другого человека обводит стороны невидимого треугольника на экране в соответствие со вспышками света. В результате исследования были выявлены активации групп областей коры, одинаковых для всех трех обсуждаемых ситуаций, а анализ функциональных связей позволил сделать вывод о том, что общая сенсорно-моторная фронто-парието-темпоральная корковая сеть задействована для физического выполнения, наблюдения и воображения одного и того же действия [10].

Согласно данным, полученным в работе [10], области головного мозга, активированные при выполнении всех трех задач, включали в себя представительство верхней конечности в первичной моторной и сомато-сенсорной коре, дорсальную и вентральную премоторную кору, ВА8 в средней лобной извилине, верхнюю и нижнюю теменную кору головного мозга, заднюю часть верхней височной извилины (включая височно-теменную узел), и заднюю часть средней височной извилины (включая экстрастриарную область тела). Общие для всех трех задач активации, которые не достигли уровня значимости, были также обнаружены в дорсальной части дополнительной моторной области (*SMAd-proper*), во вто-

ричной соматосенсорной коре и заднем прекунеусе (ВА7).

Очаги активации, уникальные для физического исполнения задачи, были обнаружены в левом (контралатеральным действующей руке) вентролатеральном таламусе, в правой вторичной соматосенсорной области, в переднем прекунеусе и переднем спиноцереbellуме (дольки IV–VI), а также в переднем церебеллуме билатерально.

Очаги активации, уникальные для наблюдения, были обнаружены в переднем спиноцереbellуме слева, а также в ВА19 билатерально. Очаги активации, уникальные для воображения, были обнаружены в правых инсule и заднем прекунеусе, в средней лобной извилине (ВА9/46), медиодорсальном таламусе и нижней лобной извилине (ВА44/45/47) билатерально, а также в передней части левой пред-дополнительной моторной области.

В отношении наличия одинаковых групп областей и общности церебральных сетей, задействованных во всех трех ситуациях, результаты данного исследования согласуются с результатами упомянутых выше мета-анализов. Однако они свидетельствуют также и о различиях этих групп. Например, в работе [10] первичная моторная кора активировалась во всех трех обсуждаемых ситуациях, в работе [79] — только при физическом выполнении движения, в работе [76] она не активировалась при воображении движения, в работе [74] первичная моторная кора рекрутировалась при наблюдении действия только тогда, когда участники наблюдали его с целью последующей физической имитации. *P. Simos et al.* [10] сообщили также об активациях, общих только для двух задач (физическое исполнение — наблюдение, физическое исполнение — воображение). Следует отметить, именно в такой разносторонней информации нуждаются экспериментаторы/клиницисты при выборе метода воздействия на церебральные структуры для коррекции конкретных моторных нарушений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тренировки с помощью воображения и наблюдения действий обычно рассматривают как две отдельные методики, которые можно использовать самостоятельно или совместно с физической тренировкой для оптимизации моторного обучения и двигательной реабилитации. Независимое применение этих методик, как это следует из данного обзора, показало целесообразность их использования. Кроме того, есть четкие доказательства, что наблюдение и воображение моторного действия могут вызывать сходные паттерны церебральной активности. Опираясь на эти дан-

ные, исследователи в настоящее время обратились к изучению результатов их совместного применения [20]. Появляются новые работы, показывающие возможные преимущества использования моторных образов во время наблюдения действия. Эта методика, по-видимому, относительно проста для здоровых взрослых, и интуитивно подразумевает более близкое соответствие физическому действию, чем его имитация только с помощью моторных образов или только с помощью наблюдения действия [36]. Еще одно направление будущих исследований связано с растущим числом полученных на здоровых людях данных, которые предполагают, что комбинация наблюдения и воображения с центральными или периферическими неинвазивными воздействиями может оказать большее влияние на пластичность мозга и моторное обучение, чем их изолированное применение [3].

Одна из причин особого интереса к воображению и наблюдению действий, заключается в том, что тренировки с их использованием влияют не только на корковые механизмы моторного контроля, но и на периферические нервные сети, так как структуры головного мозга, участвующие в подготовке движения — их первоочередная цель — проецируются на моторные области головного мозга и периферию тела [20]. Однако делать общие выводы об эффективности таких воздействий не позволяют неоднородность групп пациентов, методик реабилитационных программ и методов оценки восстановления двигательной функции. Существует и другая, не менее важная причина неоднозначности результатов. Она связана с недостатком данных фундаментальных исследований о процессах, обеспечивающих эффективность этих тренировок. Например, нет достаточно надежного способа контроля мысленного выполнения моторной задачи. Существует и дефицит данных о паттернах церебральной активности при действиях, не таких как традиционно изучаемые: “вытянул руку и взял предмет”. Но если ответы зеркальной нейронной системы действительно специфичны для выполняемого типа действия, как полагают, в частности, [79], то тогда, возможно, что различные движения (или действия) подобны различным лекарствам, применение которых может быть эффективным только в определенных ситуациях. Однако информация об этих гипотетических “ментальных лекарствах”, т.е. о паттернах церебральной активности при различных типах движений (действий) весьма ограничена. Поразительно невелика и информация о церебральной активности при наблюдении, воображении и физическом выполнении одними и теми же людьми одной и той же моторной задачи, хотя такая информация необходима клиницисту для адекватного выбора между различными видами воздей-

ствий (между наблюдением, воображением и физическим исполнением) в случае конкретных двигательных нарушений.

**Финансирование работы.** Исследование выполнено при финансовой поддержке Программы ФНИ государственных академий на 2013–2020 гг. (ГП-14, раздел 63) и программы фундаментальных исследований президиума РАН по теме 1.43 “Фундаментальные основы технологии физиологических адаптаций”.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mulder T.* Motor imagery and action observation: cognitive tools for rehabilitation // *J. Neural Transm.* (Vienna). 2007. V. 114. № 10. P. 1265.
2. *Jeannerod M.* Neural simulation of action: a unifying mechanism for motor cognition // *Neuroimage*. 2001. V. 14. P. S103.
3. *Bisio A., Bassolino M., Pozzo T., Wenderoth N.* Boosting Action Observation and Motor Imagery to Promote Plasticity and Learning // *Neural Plast.* 2018. V. 2018. Article ID 8625861.
4. *Мокиенко О.А., Черникова Л.А., Фролов А.А., Бобров П.Д.* Воображение движения и его практическое применение // *Журн. ВНД им. И.П. Павлова*. 2013. Т. 63. № 2. С. 195.  
*Mokienko O.A., Chernikova L.A., Frolov A.A., Bobrov P.D.* [Motor imagery and its practical application] // *Zh. Vyssh. Nerv. Deiat. Im I. P. Pavlova*. 2013. V. 63. № 2. P. 195.
5. *Мокиенко О.А., Люкманов Р.Х., Черникова Л.А. и др.* Интерфейс мозг-компьютер: первый опыт клинического применения в России // *Физиология человека*. 2016. Т. 42. № 1. С. 31.  
*Mokienko O.A., Lyukmanov R.K., Chernikova L.A. et al.* Brain-computer interface: the first experience of clinical use in RUSSIA // *Human Physiology*. 2016. V. 42. № 1. P. 24.
6. *Фролов А.А., Федотова И.Р., Гусек Д., Бобров П.Д.* Ритмическая активность мозга и интерфейс мозг-компьютер, основанный на воображении движений // *Успехи физиологических наук*. 2017. Т. 48. № 3. С. 72.
7. *Боброва Е.В., Решетникова В.В., Фролов А.А., Герасименко Ю.П.* Воображение движений нижних конечностей для управления системами “мозг-компьютер” // *Журн. ВНД им. И.П. Павлова*. 2019. Т. 69. № 5. С. 529.
8. *Свищёв И.Д.* Функционирование зеркальных нейронов головного мозга при обучении двигательным действиям дзюдоиста // *Экстремальная деятельность человека*. 2019. № 1. С. 38.
9. *Filimon F., Rieth C.A., Sereno M.I., Cottrell G.W.* Observed, Executed, and Imagined Action Representations can be Decoded From Ventral and Dorsal Areas // *Cereb. Cortex*. 2015. V. 25. № 9. P. 3144.

10. *Simos P.G., Kavroulakis E., Maris T. et al.* Neural foundations of overt and covert actions // *Neuroimage*. 2017. V. 152. P. 482.
11. *Di Rienzo F., Debarnot U., Daligault S. et al.* Online and Offline Performance Gains Following Motor Imagery Practice: A Comprehensive Review of Behavioral and Neuroimaging Studies // *Front. Hum. Neurosci.* 2016. V. 10. P. 315.
12. *Каплан А.Я.* Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии мозг-машинных интерфейсов в неврологической реабилитации // *Физиология человека*. 2016. Т. 42. № 1. С. 18.
13. *Kaplan A.Y.* Neurophysiological foundations and practical realizations of the brain-machine interfaces in the technology in neurological rehabilitation // *Human Physiology*. 2016. V. 42. № 1. P. 103.
14. *Boulton H., Mitra S.* Incomplete inhibition of central postural commands during manual motor imagery // *Brain Res.* 2015. V. 1624. P. 321.
15. *Malouin F., Jackson P.L., Richards C.L.* Towards the integration of mental practice in rehabilitation programs. A critical review // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 576.
16. *García Carrasco D., Aboitiz Cantalapiedra J.* Effectiveness of motor imagery or mental practice in functional recovery after stroke: a systematic review // *Neurol.* 2016. V. 31. № 1. P. 43.
17. *Gentili R., Papaxanthis C.* Laterality effects in motor learning by mental practice in right-handers // *Neurosci.* 2015. V. 297. P. 231.
18. *Sobierajewicz J., Przekoracka-Krawczyk A., Jaśkowski W. et al.* The influence of motor imagery on the learning of a fine hand motor skill // *Exp. Brain Res.* 2017. V. 235. № 1. P. 305.
19. *Di Rienzo F., Collet C., Hoyek N., Guillot A.* Impact of neurologic deficits on motor imagery: a systematic review of clinical evaluations // *Neuropsychol. Rev.* 2014. V. 24. № 2. P. 116.
20. *Mateo S., Di Rienzo F., Reilly K. et al.* Improvement of grasping after motor imagery in C6–C7 tetraplegia: a kinematic and MEG pilot study // *Restor. Neurol. Neurosci.* 2015. V. 33. № 4. P. 543.
21. *Caligiore D., Mustile M., Spalletta G., Baldassarre G.* Action observation and motor imagery for rehabilitation in Parkinson's disease: A systematic review and an integrative hypothesis // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. V. 72. P. 210.
22. *Beyaert C., Vasa R., Frykberg G.E.* Gait post-stroke: Pathophysiology and rehabilitation strategies // *Neurophysiol. Clin.* 2015. V. 45. № 4–5. P. 335.
23. *Morawietz C., Moffat F.* Effects of locomotor training after incomplete spinal cord injury: a systematic review // *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 2013. V. 94. № 11. P. 2297.
24. *Mateo S., Di Rienzo F., Bergeron V. et al.* Motor imagery reinforces brain compensation of reach-to-grasp movement after cervical spinal cord injury // *Front. Behav. Neurosci.* 2015. V. 9. P. 234.
25. *Pelletier R., Higgins J., Bourbonnais D.* Addressing Neuroplastic Changes in Distributed Areas of the Nervous System Associated With Chronic Musculoskeletal Disorders // *Phys. Ther.* 2015. V. 95. № 11. P. 1582.
26. *Ruffino C., Papaxanthis C., Lebon F.* Neural plasticity during motor learning with motor imagery practice: review and perspectives // *Neurosci.* 2017. V. 341. P. 61.
27. *MacIver K., Lloyd D.M., Kelly S. et al.* Phantomlimb pain, cortical reorganization and the therapeutic effect of mental imagery // *Brain*. 2008. V. 131. Pt. 8. P. 2181.
28. *Di Rienzo F., Guillot A., Mateo S. et al.* Neuroplasticity of prehensile neural networks after quadriplegia // *Neuroscience*. 2014. V. 274. P. 82.
29. *Molina M., Tijus C., Jouen F.* The emergence of motor imagery in children // *J. Exp. Child Psychol.* 2008. V. 99. № 3. P. 196.
30. *Spruijt S., van der Kamp J., Steenbergen B.* Current insights in the development of children's motor imagery ability // *Front. Psychol.* 2015. V. 6. P. 787.
31. *Kalicinski M., Kempe M., Bock O.* Motor imagery: effects of age, task complexity, and task setting // *Exp. Aging Res.* 2015. V. 41. № 1. P. 25.
32. *van der Meulen M., Allali G., Rieger S.W. et al.* The influence of individual motor imagery ability on cerebral recruitment during gait imagery // *Hum. Brain Mapp.* 2014. V. 35. № 2. P. 455.
33. *Malouin F., Richards C.L., Durand A. et al.* Effects of practice, visual loss, limb amputation, and disuse on motor imagery vividness // *Neurorehabil. Neural. Repair.* 2009. V. 23. № 5. P. 449.
34. *Debarnot U., Sperduti M., Di Rienzo F., Guillot A.* Experts bodies, experts minds: How physical and mental training shape the brain // *Front. Hum. Neurosci.* 2014. V. 8. P. 280.
35. *Guillot A., Di Rienzo F., Macintyre T. et al.* Imagining is Not doing but involves specific motor commands: a review of experimental data related to motor inhibition // *Front. Hum. Neurosci.* 2012. V. 6. Article 247.
36. *Harris J.E., Hebert A.* Utilization of motor imagery in upper limb rehabilitation: a systematic scoping review // *Clin. Rehabil.* 2015. V. 29. № 11. P. 1092.
37. *Eaves D.L., Riach M., Holmes P.S., Wright D.J.* Motor Imagery during Action Observation: A Brief Review of Evidence, Theory and Future Research Opportunities // *Front. Neurosci.* 2016. V. 10. P. 514.
38. *Stins J.F., Schneider I.K., Koole S.L., Beek P.J.* The Influence of Motor Imagery on Postural Sway: Differential Effects of Type of Body Movement and Person Perspective // *Adv. Cogn. Psychol.* 2015. V. 11. № 3. P. 77.
39. *Collet C., Di Rienzo F., El Hoyek N., Guillot A.* Autonomic nervous system correlates in movement observation and motor imagery // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. V. 7. Article 415.
40. *Bunno Y., Suzuki T., Iwatsuki H.* Motor imagery muscle contraction strength influences spinal motor neuron excitability and cardiac sympathetic nerve activity // *J. Phys. Ther. Sci.* 2015. V. 27. № 12. P. 3793.
41. *Takemi M., Masakado Y., Liu M., Ushiba J.* Sensorimotor event-related desynchronization represents the excitability of human spinal motoneurons // *Neurosci.* 2015. V. 297. P. 58.
42. *Williams J., Pearce A., Loporto M. et al.* The relationship between corticospinal excitability during motor imagery and motor imagery ability // *Behav. Brain Res.* 2012. V. 226. № 2. P. 369.

42. *Bock O., Schott N., Papaxanthis C.* Motor imagery: lessons learned in movement science might be applicable for spaceflight // *Front. Syst. Neurosci.* 2015. V. 9. Article 75.
43. *Kumar V.K., Chakrapani M., Kedambadi R.* Motor Imagery Training on Muscle Strength and Gait Performance in Ambulant Stroke Subjects-A Randomized Clinical Trial // *J. Clin. Diagn. Res.* 2016. V. 10. № 3. P. YC01.
44. *Grosprêtre S., Lebon F., Papaxanthis C., Martin A.* New evidence of corticospinal network modulation induced by motor imagery // *J. Neurophysiol.* 2016. V. 115. № 3. P. 1279.
45. *Takemi M., Masakado Y., Liu M., Ushiba J.* Event-related desynchronization reflects down-regulation of intracortical inhibition in human primary motor cortex // *J. Neurophysiol.* 2013. V. 110. № 5. P. 1158.
46. *Cattaneo L., Rizzolatti G.* The mirror neuron system // *Arch. Neurol.* 2009. V. 66. № 5. P. 557.
47. *Лебедева Н.Н., Зуфман А.И., Мальцев В.Ю.* Система зеркальных нейронов мозга: ключ к обучению, формированию личности и пониманию чужого сознания // *Успехи физиологических наук.* 2017. Т. 48. № 4. С. 16.
48. *Базян А.С.* Зеркальные нейроны, физиологическая роль, особенности функционирования и эмоционально насыщенная когнитивная карта мозга // *Успехи физиологических наук.* 2019. Т. 50. № 2. С. 42.
49. *Rizzolatti G., Craighero L.* The mirror-neuron system // *Annu. Rev. Neurosci.* 2004. V. 27. № 1. P. 169.
50. *Mukamel R., Ekstrom A.D., Kaplan J. et al.* Single-neuron responses in humans during execution and observation of actions // *Curr. Biol.* 2010. V. 20. № 8. P. 750.
51. *Naish K.R., Houston-Price C., Bremner A.J., Holmes N.P.* Effects of action observation on corticospinal excitability: Muscle specificity, direction, and timing of the mirror response // *Neuropsychol.* 2014. V. 64. P. 331.
52. *Barchiesi G., Cattaneo L.* Motor performance // *Neuropsychol.* 2015. V. 69. P. 93.
53. *Rizzolatti G., Rozzi S.* The mirror mechanism in the parietal lobe // *Handb. Clin. Neurol.* 2018. V. 151. P. 555.
54. *Rizzolatti G., Fabbri-Destro M., Cattaneo L.* Mirror neurons and their clinical relevance // *Nat. Clin. Pract. Neurol.* 2009. V. 5. № 1. P. 24.
55. *Gatti R., Rocca M.A., Fumagalli S. et al.* The effect of action observation/execution on mirror neuron system recruitment: an fMRI study in healthy individuals // *Brain Imag. Behav.* 2017. V. 11. № 2. P. 565.
56. *Calvo-Merino B., Grezes J., Glaser D.E. et al.* Seeing or doing? Influence of visual and motor familiarity in action observation // *Current. Biology.* 2006. V. 16. № 19. P. 1905.
57. *Agnew Z.K., Wise R.J., Leech R.* Dissociating object directed and non-object directed action in the human mirror system; implications for theories of motor simulation // *PLoS One.* 2012. V. 7. № 4. P. e32517.
58. *Plata Bello J., Modrono C., Marcano F., Gonzalez-Mora J.L.* Observation of simple intransitive actions: the effect of familiarity // *PLoS One.* 2013. V. 8. № 9. P. e74485.
59. *Buccino G., Binkofski F., Fink G.R. et al.* Action observation activates premotor and parietal areas in a somatotopic manner: an fMRI study // *Eur. J. Neurosci.* 2001. V. 13. P. 400.
60. *Gallese V., Fadiga L., Fogassi L., Rizzolatti G.* Action recognition in the premotor cortex // *Brain.* 1996. V. 119. Pt. 2. P. 593.
61. *Roberts J.W., Bennett S.J., Elliott D., Hayes S.J.* Top-down and bottom-up processes during observation: implications for motor learning // *Eur. J. Sport Sci.* 2014. V. 14. Suppl. 1. P. S250.
62. *Ge S., Liu H., Lin P. et al.* Neural Basis of Action Observation and Understanding From First- and Third-Person Perspectives: An fMRI Study // *Front. Behav. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 283.
63. *Angelini M., Fabbri-Destro M., Lopomo N.F. et al.* Perspective-dependent reactivity of sensorimotor mu rhythm in alpha and beta ranges during action observation: an EEG study // *Sci. Rep.* 2018. V. 20. № 8(1). P. 12429.
64. *Hager B.M., Yang A.C., Gutsell J.N.* Measuring Brain Complexity During Neural Motor Resonance // *Front. Neurosci.* 2018. V. 12. P. 758.
65. *Bassolino M., Sandini G., Pozzo T.* Activating the motor system through action observation: is this an efficient approach in adults and children? // *Dev. Med. Child. Neurol.* 2015. V. 57. Suppl. 2. P. 42.
66. *Borges L.R., Fernandes A.B., Melo L.P. et al.* Action observation for upper limb rehabilitation after stroke // *Cochrane Database Syst. Rev.* 2018. V. 10. № 10. P. CD011887.
67. *Mattar A.G., Gribble P.L.* Motor learning by observation // *Neuron.* 2005. V. 46. № 1. P. 153.
68. *McGregor H.R., Cashaback J.G.A., Gribble P.L.* Somatosensory Perceptual Training Enhances Motor Learning by Observing // *J. Neurophysiol.* 2018. V. 120. № 6. P. 3017.
69. *McGarry L.M., Russo F.A., Schalles M.D., Pineda J.* Audio-visual facilitation of mu rhythm // *Exp. Brain Res.* 2012. V. 218. № 4. P. 527.
70. *Buccino G.* Action observation treatment: a novel tool in neurorehabilitation // *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 2014. V. 369. № 1644. P. 20130185.
71. *Sarasso E., Gemma M., Agosta F. et al.* Action observation training to improve motor function recovery: a systematic review // *Arch. Physiother.* 2015. V. 5. P. 14.
72. *Buccino G., Molinaro A., Ambrosi C. et al.* Action Observation Treatment Improves Upper Limb Motor Functions in Children with Cerebral Palsy: A Combined Clinical and Brain Imaging Study // *Neural Plast.* 2018. V. 2018. P. 4843985.
73. *Grezes J., Decety J.* Functional Anatomy of Execution, Mental Simulation, Observation, and Verb Generation of Actions: A Meta-Analysis // *Human Brain Mapping.* 2001. V. 12. P. 1.
74. *Caspers S., Zilles K., Laird A.R., Eickhoff S.B.* ALE meta-analysis of action observation and imitation in the human brain // *Neuroimage.* 2010. V. 50. № 3. P. 1148.

75. *Molenberghs P., Cunnington R., Mattingley J.B.* Brain regions with mirror properties: a meta-analysis of 125 human fMRI studies // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2012. V. 36. № 1. P. 341.
76. *Hetu S., Gregoire M., Saimpont A. et al.* The neural network of motor imagery: an ALE meta-analysis // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2013. V. 37. № 5. P. 930.
77. *Hardwick R.M., Caspers S.B., Eickhoff S., Swinnen S.P.* Neural Correlates of Action: Comparing Meta-Analyses of Imagery, Observation, and Execution // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2018. V. 94. P. 31.
78. *Savaki H.E., Raos V.* Action Perception and Motor Imagery: Mental Practice of Action // *Prog. Neurobiol.* 2019. V. 175. P. 107.
79. *Filimon F., Nelson J.D., Hagler D.J., Sereno M.I.* Human cortical representations for reaching: mirror neurons for execution, observation, and imagery // *Neuroimage.* 2007. V. 37. № 4. P. 1315.

## Cognitive Motor Rehabilitation: Imagination and Observation of Motor Actions

Yu. K. Stolbkov<sup>a</sup>, Yu. P. Gerasimenko<sup>a, \*</sup>

<sup>a</sup>*Pavlov Institute of Physiology of RAS, St. Petersburg, Russia*

<sup>\*</sup>*E-mail: gerasimenko@infran.ru*

Motor rehabilitation can be considered as a learning process in which lost skills should be restored, and new ones should be acquired on the basis of physical training. The question is. Does the exercise training is the necessary condition to achieve these goals? Many authors have shown that both the imagination and observation of motor actions lead to the activation of the same areas of the brain as their physical counterparts, and that they can cause the same plastic changes in the motor system as a real physical training. The review presents data regarding to the theoretical basis of using of imagination and observation of motor actions as a substitute for physical action in the motor rehabilitation. Besides, the data on the commonality of their neural substrates, behavioral and neurophysiological data on their use in healthy people and in clinical practice is discussed.

*Keywords:* movements, motor actions, training, rehabilitation, motor images, movement imagination, action observation.