

ОГЛАВЛЕНИЕ

Сокращения	9
Предисловие	13

Часть I.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОЙ НЕВРОЛОГИИ

Глава 1.	Структурная организация двигательного контроля и обучения (Л.А. Черникова)	18
1.1.	Общее понятие об уровнях обработки информации системы моторного контроля	18
1.2.	Структурные единицы ЦНС	19
1.3.	Соматосенсорная система	28
1.3.1.	Периферические рецепторы	28
1.3.2.	Периферические нервы	32
1.3.3.	Восходящие пути	33
1.3.4.	Таламус	35
1.3.5.	Соматосенсорная кора	37
1.4.	Двигательная система	40
1.5.	Мозжечок	47
1.6.	Базальные ганглии	50
1.7.	Ствол мозга	53
	Литература	56
Глава 2.	Двигательный контроль и нейрореабилитационные подходы (К.И. Устинова, Л.А. Черникова)	61
2.1.	Эволюция теорий двигательного контроля	61
2.2.	Нейрореабилитационные методы, основанные на теориях двигательного контроля	69
	Литература	76

Глава 3.	Двигательное обучение и его применение в нейрореабилитации (К.И. Устинова, Л.А. Черникова).....	80
	3.1. Формы и виды двигательного обучения.....	80
	3.2. Формирование двигательного навыка.....	88
	Литература.....	94
Глава 4.	Механизмы нейропластичности (Р.М. Умарова).....	102
	4.1. Молекулярные механизмы нейропластичности.....	102
	4.2. Клеточные механизмы нейропластичности.....	104
	4.3. Реорганизация функциональных систем мозга.....	106
	4.4. Функциональная реорганизация мозга и восстановление поврежденных функций у людей по данным нейровизуализации.....	108
	4.4.1. Двигательная система.....	109
	4.4.2. Система речи.....	112
	4.4.3. Система пространственного внимания. Неглект.....	113
	4.5. Структурная реорганизация при повреждении мозга.....	116
	Литература.....	119
Часть II.		
ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ		
Глава 5.	Терапия с ограничением движения (СИ-терапия) (А.С. Клочков, Л.А. Черникова).....	124
	5.1. Общее понятие и сущность метода СИ-терапии.....	124
	5.2. СИ-терапия у больных, перенесших инсульт.....	126
	5.3. СИ-терапия при детском церебральном параличе.....	132
	Литература.....	134
Глава 6.	Зеркальная терапия в нейрореабилитации (М.А. Назарова).....	138
	6.1. Общее понятие о зеркальной терапии.....	138
	6.2. Пластичность сенсорных и моторных карт мозга человека.....	139
	6.3. Фантомные боли и история открытия ЗТ.....	141
	6.4. Принципы и методология ЗТ.....	144
	6.5. Зеркальная иллюзия/иллюзорное восприятие движения у здоровых.....	145
	6.6. Механизмы ЗТ и зеркальной иллюзии.....	147
	6.7. Область применения ЗТ.....	151
	6.7.1. ЗТ в реабилитации после инсульта.....	151
	6.7.2. ЗТ при фантомной боли.....	152
	6.7.3. ЗТ при комплексном региональном болевом синдроме.....	152
	6.8. Перспективы применения ЗТ и изучения зеркальной иллюзии.....	153
	Литература.....	154
Глава 7.	Виртуальная реальность в нейрореабилитации (К.И. Устинова, А.С. Клочков, Л.А. Черникова).....	158
	7.1. Значение виртуальной реальности в восстановлении движений.....	158
	7.2. Технологии виртуальной реальности.....	159
	7.3. Восстановление позы и равновесия с помощью виртуальной реальности.....	166

	7.4. Восстановление локомоции с помощью виртуальной реальности.....	168
	7.5. Восстановление движений руки с помощью виртуальной реальности.....	170
	7.6. Восстановление бытовых навыков с помощью виртуальной реальности.....	172
	7.7. Оценка двигательных нарушений с помощью виртуальной реальности.....	173
	7.8. Многоцелевые реабилитационные системы виртуальной реальности.....	174
	7.9. Интеграция виртуальной реальности с другими реабилитационными и диагностическими системами	175
	Литература.....	179
Глава 8.	Роботизированные технологии в нейрореабилитации (А.С. Ключков, Л.А. Черникова)	183
	8.1. Общее понятие о роботах.....	183
	8.2. Роботы-помощники (ассистирующие роботы).....	183
	8.3. Реабилитационные роботы и роботизированные устройства.....	187
	8.3.1. Роботы и роботизированные устройства для тренировки паретичной руки	189
	8.3.2. Роботы и роботизированные устройства для тренировки ходьбы	200
	Литература.....	215
Глава 9.	Интерфейс мозг–компьютер в современной нейрореабилитации (О.А. Мокиенко, П.Д. Бобров, В.Ю. Роцин, А.А. Фролов, Л.А. Черникова)	221
	9.1. Определение и разновидности интерфейсов, применяемых в медицине.	221
	9.1.1. Инвазивные ИМК.....	223
	9.1.2. Неинвазивные вспомогательные и восстановительные ИМК	224
	9.2. ИМК, основанные на воображении движения	228
	9.2.1. Анатомо–физиологические основы воображения движения	228
	9.2.2. Пластические процессы, сопровождающие тренировки воображения движения с помощью ИМК у здоровых людей.....	230
	9.2.3. Способность воображать движения после повреждения головного мозга	231
	9.2.4. Улучшение двигательной функции на фоне тренировок воображения движения	232
	9.2.5. Применения основанного на воображении движения ИМК в нейрореабилитации	234
	Литература.....	241
Глава 10.	Ритмическая транскраниальная магнитная стимуляция в нейрореабилитации (А.В. Червяков, А.Г. Пойдашева, Ю.Е. Коржова).....	247
	10.1. Общие понятия о ТМС. Суть новой технологии рТМС	247
	10.2. рТМС при инсульте.....	250
	10.3. рТМС при болезни Паркинсона.....	253
	10.4. рТМС при фокальной дистонии (писчий спазм, блефароспазм).....	255

10.5. рТМС при болевых синдромах.....	256
10.6. рТМС при эпилепсии.....	259
10.7. рТМС при тинните.....	260
10.8. рТМС в лечении больных со спастичностью.....	261
10.9. рТМС при депрессии.....	263
10.10. рТМС при тревожном расстройстве.....	265
10.11. Безопасность рТМС.....	265
Литература.....	272
Глава 11. Транскраниальная электрическая стимуляция в лечении и реабилитации заболеваний нервной системы (А.Г. Пойдашева, А.В. Червяков).....	283
11.1. Общие положения по использованию ТЭС.....	283
11.2. ТЭС при инсульте.....	284
11.3. ТЭС при хроническом болевом синдроме.....	285
11.4. ТЭС при деменции.....	287
11.5. ТЭС при эмоционально-волевых расстройствах.....	287
Литература.....	289
Глава 12. Космические технологии в нейрореабилитации (И.В. Саенко, Л.А. Черникова, И.Б. Козловская).....	294
12.1. Нейрофизиологические механизмы гипогравитационного двигательного синдрома.....	294
12.2. Применение лечебного костюма «Регент» в реабилитации больных с очаговыми поражениями ЦНС.....	304
12.3. Метод механической стимуляции опорных зон стоп.....	311
12.3.1. Эффекты механической стимуляции опорных зон стоп в условиях невесомости.....	311
12.3.2. Клинико-нейровизуализационные эффекты механической стимуляции опорных зон стоп (устройство «Корвит» в клинике инсульта.....	316
12.3.3. Эффекты механической стимуляции опорных зон стоп в острой стадии тяжелого ишемического инсульта.....	325
12.4. Метод «сухая» иммерсия — фундаментальные и прикладные возможности.....	330
Литература.....	334

ЗЕРКАЛЬНАЯ ТЕРАПИЯ В НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ

М.А. Назарова

Иногда отражение в зеркале более реально, чем сам объект...
Л. Кэрролл. Алиса в стране чудес

6.1. Общее понятие о зеркальной терапии

Зеркало — важный элемент двигательной реабилитации, способствующий пониманию своей позы пациентом во время занятий. Однако зеркальная обратная связь может быть использована и как самостоятельный метод лечения.

Зеркальная терапия (ЗТ) — это новый доступный метод восстановления движения и лечения болевых синдромов путем создания искусственной зрительной обратной связи.

К настоящему времени эффективность метода ЗТ доказана для лечения таких болевых синдромов, как фантомные боли, комплексный региональный болевой синдром 1-го и 2-го типов и для двигательной реабилитации больных с гемипарезом после инсульта. Считается, что метод ЗТ позволяет с помощью зеркальной зрительной обратной связи от здоровой конечности остановить процесс «деафферентации» пораженной конечности при прекращении или резком нарушении от нее тактильной и проприоцептивной афферентации в связи с внезапной обездвиженностью или ампутацией.

Метод ЗТ был впервые предложен в начале 1990-х годов профессором Вилаянуром Рамачандраном для лечения фантомных болей [Ramachandran V.S. et al., 1995]. Его же исследовательская группа через несколько лет описала использование метода зеркальной обратной связи для восстановления движений у больных с гемипарезом после инсульта [Altschuler E.L. et al., 1999].

Принцип метода ЗТ очень прост: перед пациентом с односторонними двигательными/сенсорными нарушениями ставится зеркало отражающей поверхностью в сторону здоровой руки или ноги, пациент смотрит в зеркало в сторону своей больной конечности и видит в нем отражение здоровой. При выполнении двигательных

и сенсорных заданий здоровой конечностью ее зеркальное отражение воспринимается как сама больная конечность, и у пациента возникает ощущение, что больная рука/нога работает как здоровая.

В качестве возможных механизмов действия ЗТ наиболее часто исследуются и обсуждаются в литературе следующие: 1) возможность, используя визуальную обратную связь, соединять посылаемую эфферентную команду с положительным зрительным подкреплением, что приводит к переучиванию «выученной» компоненты пареза или боли; 2) возможность с помощью зрительной обратной связи от здоровой «зеркальной» конечности непосредственно влиять на состояние сенсомоторной коры пораженного полушария, в том числе возможная роль высокочастотных гамма-осцилляций сенсомоторной коры «зеркального полушария»; 3) роль так называемых зеркальных нейронов, активирующихся как при выполнении действия, так и при наблюдении за данным действием; 4) возможное задействование ипсилатеральных проводящих путей.

Очевидные плюсы метода ЗТ заключаются в простоте использования, доступности, возможности использования в домашних условиях. Помимо эффективности ЗТ в качестве лечебной технологии, зеркальная иллюзия может быть исследована как парадигма для нейровизуализационных и нейрофизиологических исследований для изучения проблемы пластичности сенсорных и моторных карт мозга, нейробиологических основ схемы тела и осознания собственного «я» как в норме, так и у неврологических пациентов.

В данной главе будут освещены следующие вопросы:

- ♦ пластичность сенсорных и моторных карт мозга человека, в том числе в ответ на резкое изменение афферентации;
- ♦ фантомные боли (нозология, для лечения которой впервые был предложен метод ЗТ);
- ♦ методология ЗТ (принципы ЗТ и особенности применения ЗТ при различных нозологиях);
- ♦ зеркальная иллюзия/иллюзорное восприятие движения у здоровых;
- ♦ механизмы ЗТ и зеркальной иллюзии;
- ♦ область применения ЗТ в клинике и ее эффективность;
- ♦ перспективы применения ЗТ и изучения зеркальной иллюзии.

6.2. Пластичность сенсорных и моторных карт мозга человека

Вплоть до недавнего времени общепринятым мнением неврологов считалась необратимость последствий повреждения головного мозга. Первые публикации, свидетельствующие о способности мозга взрослого человека к изменениям, начали появляться в конце 1960-х годов в пионерских работах Р. Bach-у-Rita по сенсорному замещению [Bach-у-Rita P. et al., 1969]. Оценка возможностей восстановления и разработка подходов для восстановления после поражения нервной системы, в том числе с использованием различных модальностей, как, например, при ЗТ подмена проприоцептивной обратной связи зрительной обратной связью, напрямую связаны с концепцией локализации функции в мозге — одним из наиболее фундаментальных вопросов нейробиологии.

Противостояние парадигм локализационизма и холизма происходит в нейронауке с начала XIX века, начиная с работ Ж. Флуранса, развивающего идеи эквипотенциализма отделов мозга в противовес концепции локализационизма Ф. Галля, а чуть позже работ Ж.П. Брока и К. Вернике, повлекших огромный бум локализационизма в первую очередь в публикациях неврологов. Как ни странно, и в настоящее время противодействие этих двух парадигм продолжается на всех методологических уровнях — от клеточного до системного. Возвращение к идеям жесткого локализационизма, вплоть, по мнению некоторых исследователей, до ренессанса идей Галля — «неофренологии», произошедшее в 1990-х годах благодаря широкому внедрению нейровизуализации, в первую очередь фМРТ, только начинает уступать место концепции пластичности как основного свойства мозга [Pascual-Leone A. et al., 2005].

В настоящее время происходит возрождение концепций Анохина и Бернштейна о системной организации функций, разрабатывавшихся в нашей стране в начале XX века. Крайне модным на Западе подходом сейчас является изучение целенаправленных действий (*goal-oriented action*), что получило отражение и в новых подходах к нейрореабилитации: наиболее современными нейрореабилитации сегодня считаются такие, которые в первую очередь ориентированы на тренировку выполнения определенной целенаправленной задачи (*task-oriented/goal-oriented approach*).

За последние 20 лет способность взрослого мозга к реорганизации на протяжении всей жизни — как в норме, так и при патологии — была продемонстрирована уже в сотнях экспериментальных, нейрофизиологических и нейровизуализационных работ [Rossini P.M. et al., 2007]. Одним из первых подтверждений возможности масштабных перестроек сенсорных карт во взрослом мозге человека с высокоспецифичными последствиями для восприятия, полученным с помощью современных неинвазивных методов нейровизуализации стала публикация группы В. Рамачандрана

в 1992 г. о перестройках мозга у пациента после травматической ампутации конечности. Детальное изучение тактильной чувствительности у юноши, потерявшего руку в автоаварии и страдавшего фантомными болями в области ампутированной конечности, показало наличие подробной тактильной карты отсутствующей кисти на щеке с ипсилатеральной стороны (рис. 6.1).

Перестройка чувствительной карты у вышеописанного пациента была подтверждена с помощью магнитоэнцефалографии (МЭГ): картирование контралатеральной по отношению к потерянной конечности зоны первичной соматосенсорной коры (SI) показало, что зона лица значительно перекрывает зону руки по сравнению с противоположным полушарием [Ramachandran V.S., 1993; Yang T.T. et al., 1994]. В дальнейшем перестройки сенсорных представлений в коре и таламусе на фоне изменения сенсорного входа были продемонстрированы в большом числе работ [McCabe C.S. et al., 2003; Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009; Turton A.J., Butler S.R., 2001].

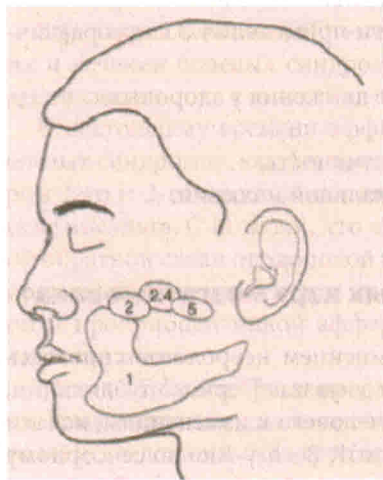


Рис. 6.1. Области на щеке у пациента с ампутированной конечностью, вызывающие ощущение прикосновения к 1-му, 2-му, 3-му и 5-му пальцам (обозначено цифрами) (по V.S. Ramachandran и соавт., 2009)

Множественные доказательства примеров перестройки моторных карт на уровне коры полушария также были получены как на животных, так и на людях, как в ходе реабилитации пациентов с двигательными нарушениями, так и в норме на фоне тренировки моторных навыков — например, у спортсменов и музыкантов [Bangert M. et al., 2006; Vaalto S. et al., 2013]. Важно отметить, что пластичность сенсорных и моторных карт была продемонстрирована не только проявлением долговременных эффектов, но и в виде онлайн-эффекта «прекондиционирования» [Lioumis P. et al., 2012] (рис. 6.2).



Рис. 6.2. Перемещение точки максимального вызванного ответа на транскраниальную магнитную стимуляцию в первой межостной мышце (FDI) у 3 пациентов через 1 мес. (old) и через 3 мес. после инсульта (new) (по P. Lioumis и соавт., 2012)

Так было показано увеличение ответа отдельной мышцы при *транскраниальной магнитной стимуляции* (ТМС) во время представления конкретного движения, например увеличение вызванных моторных ответов с мышц языка при внутреннем проговаривании слова, для артикуляции которого необходима работа мышц языка по сравнению со словом, при произношении которого напряжение мышц языка не происходит [Mottonen R., Watkins K.E., 2012]. Все больше появляется данных, подтверждающих возможность влияния на моторную кору через другие модальности: зрение, слух. Например, была продемонстрирована активация моторной коры в соматотопическом порядке при произнесении слов, относящихся к движению разных частей тела [Hauk O. et al., 2004] (рис. 6.3).

Показано, что у музыкантов или у испытуемых не музыкантов после обучения работе на клавиатуре с использованием музыкального кода по сравнению с необученными людьми при прослушивании музыки происходит активация моторной коры [Bangert M. et al., 2006] (рис. 6.4).

6.3. Фантомные боли и история открытия ЗТ

Как уже было отмечено, к одним из наиболее ярких первых описанных примеров перестройки сенсорных карт относят демонстрацию перестройки коры мозга в условиях физически измененного входа — после ампутации конечностей. Ампутация считается достаточно распространенной операцией, пациенты, пережившие утрату конечности, — это в первую очередь люди, принимавшие участие в зонах военных конфликтов, пострадавшие после дорожно-транспортных происшествий, а также больные с сахарным диабетом, с осложненными трофическими

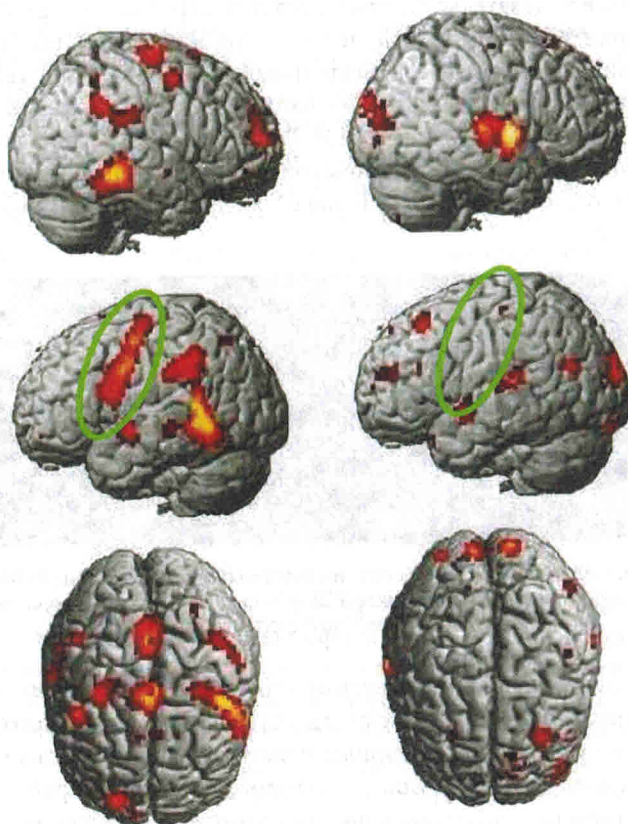


Рис. 6.3. Области мозга, активирующиеся в соматотопической последовательности при прочтывании слов, обозначающие движения разных частей тела (лизать — *lick*, брать — *pick*, пинать — *kick*). Гемодинамический ответ на функциональную магнитно-резонансную томографию при активных движениях и при прочтении слов, обозначающих движения (по O. Hauk и соавт., 2004)

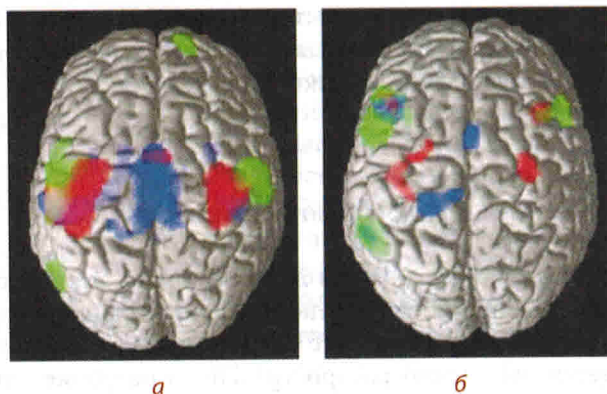


Рис. 6.4. Дополнительная активация в первичной моторной коре (M1) у профессиональных пианистов (а) по сравнению с не музыкантами (б) при прослушивании фортепьянной музыки без движения пальцами (по M. Bangert M. и соавт., 2006)

нарушениями. В США количество пациентов, перенесших ампутацию конечностей на 2005 г., составляло 1,6 млн человек и, по оценкам экспертов, к 2050 г. должно достигнуть 3,6 млн.

Феномен ощущения фантомных конечностей интересовал людей с давних пор и по сей день остается одним из наиболее загадочных примеров взаимодействия «душа–тело». Известен пример лорда Нельсона, длительное время ощущавшего руку после ее потери в бою и использовавшего наличие у себя этого ощущения для доказательства существования бестелесной души. Сам термин «фантомная конечность» был введен еще в 1872 г. Митчелом [Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009].

При этом если сам феномен ощущения утраченной конечности как фантома не представляет собой болезненного состояния и даже может быть использован для обучения управления протезом, то связанный с фантомом болевой синдром — фантомная боль (ФБ) — часто является крайне мучительным для пациента. Ощущения в области фантома могут быть жгучими, сжимающими, давящими и стреляющими, прерывистыми или постоянными и часто сильно снижают качество жизни пациента. По данным разных авторов, болями в области фантома страдают 50–80% лиц, перенесших ампутацию конечности [Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009].

Причины возникновения ФБ малопонятны и включают по меньшей мере следующее [Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009]:

- ♦ раздражение нервных окончаний (неврома) и ткани шрама в области культи;
- ♦ перестройка сенсомоторной коры полушария, контралатерального утраченной конечности;
- ♦ несоответствие посылаемой моторной команды и «ожидаемого», но отсутствующего зрительного и проприоцептивного входа;
- ♦ «запоминание» острой или хронической боли в конечности, предшествующей ампутации.

Невромы считаются наименее значимой причиной возникновения ФБ, тем не менее именно они остаются главной мишенью для удаления хирургами [Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009]. Для лечения ФБ применяется множество методов, включая хирургические, ни один из которых не является эффективным для всех пациентов [Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009]. Болевой синдром в области фантома сопровождается у некоторых пациентов возможностью свободно двигать фантомной конечностью, а у других, наоборот, ощущением «парализованности» фантома, часто в неудобной, болезненной позе, например со сжатием кулака фантомной руки, при котором ногти впиваются в ладонную поверхность кисти.

Было отмечено, что у многих пациентов, предъявлявших жалобы на ощущение обездвиженности фантома, конечность была парализована в течение длительного времени до ампутации [Ramachandran V.S., Altschuler E.L., 2009]. Исходя из этого, В. Рамачандраном была высказана гипотеза, что именно несоответствие эфферентной команды мозга и ответной сенсорной информации о ее выполнении — постоянное отрицательное подкрепление «конечность не двигается» — может приводить к «заучиванию» пареза. В таком случае, возможно, этот «выученный компонент» фантомной боли может присутствовать и у больных с двигательными нарушениями после инсульта — при внезапно возникшем несоответствии эфферентной команды мозга и ответной сенсорной информации в остром периоде инсульта, когда объем поражения кортикофугальных волокон за счет отека белого вещества больше, чем

истинный размер очага. Данное заключение послужило основанием для следующего предположения: заменив потерянную афферентную связь искусственно созданной обратной связью другой модальности, например используя «виртуальную реальность», возможно повернуть вспять эффект деафферентации.



Рис. 6.5. Тренировки в течение 2 нед. с помощью «зеркального ящика» помогли пациенту избавиться от фантомных болей, которыми он страдал в течение 11 лет (по S.V. Ramachandran и E.M. Hubbard, 2003)

Эффективность ЗТ как клинической технологии была впервые продемонстрирована у пациента, страдавшего постоянными фантомными болями в течение 11 лет. Впервые он почувствовал уменьшение боли, когда попробовал выполнять движения здоровой рукой, глядя на ее отражение в зеркале. При этом больной не только увидел свою фантомную руку двигающейся, но и ощутил ее движение (рис. 6.5). В дальнейшем на фоне ЗТ в течение нескольких недель произошло постепенное исчезновение фантома: сначала на время занятия ЗТ, затем и окончательно [Ramachandran V.S., Hubbard E.M., 2003].

6.4. Принципы и методология ЗТ

Методика проведения ЗТ очень проста: перед пациентом с односторонними двигательными/чувствительными нарушениями в конечности ставится зеркало отражающей поверхностью в сторону здоровой руки или ноги, ориентированное таким образом, что пациент видит только свою здоровую конечность и ее отражение в зеркале (рис. 6.6).



Рис. 6.6. Принцип применения зеркальной терапии

ИНТЕРФЕЙС МОЗГ–КОМПЬЮТЕР В СОВРЕМЕННОЙ НЕЙРОРЕАБИЛИТАЦИИ

**О.А. Мокиенко, П.Д. Бобров, В.Ю. Рощин,
А.А. Фролов, Л.А. Черникова**

9.1. Определение и разновидности интерфейсов, применяемых в медицине

Интерфейс мозг–компьютер (ИМК), или по-англ. *Brain-Computer Interface* (BCI), — это технология, позволяющая осуществлять прямое преобразование данных об электрической или метаболической активности мозга человека или животного в сигналы управления внешним техническим устройством [Vidal J.J., 1973]. Встречаются и другие названия данной технологии — «нейрокомпьютерный интерфейс», «прямой нейронный интерфейс», «мозговой интерфейс».

В общем случае схема ИМК следующая. Сигналы активности мозга регистрируются с поверхности головы или с помощью вживляемых электродов. С помощью компьютерной обработки из полученных сигналов выделяются компоненты, значимые для управления внешним устройством. Затем происходит преобразование этих компонентов и формирование команды, передаваемой на внешнее устройство, например монитор компьютера, обеспечивающий выбор нужного слова или буквы; манипулятор инвалидной коляски или протез руки (*рис. 9.1*). В ИМК, как правило, также входит система, поставляющая мозгу информацию о результатах выполнения команды (обычно с помощью зрения).

Существуют инвазивные интерфейсы, в которых в качестве сигналов, отражающих активность мозга, используются электрокортикограмма (ЭКОГ) или импульсная активность нейронов, регистрируемых одним или множеством вживляемых в ткань мозга микроэлектродов. В неинвазивных интерфейсах регистрируются электроэнцефалограмма (ЭЭГ), магнитоэнцефалограмма (МЭГ), функциональная магнитно-резонансная томограмма (фМРТ) или спектроскопия в ближней инфракрасной области (NIRS, near infrared spectroscopy) [Nicolas-Alonso L.F. et al., 2012].

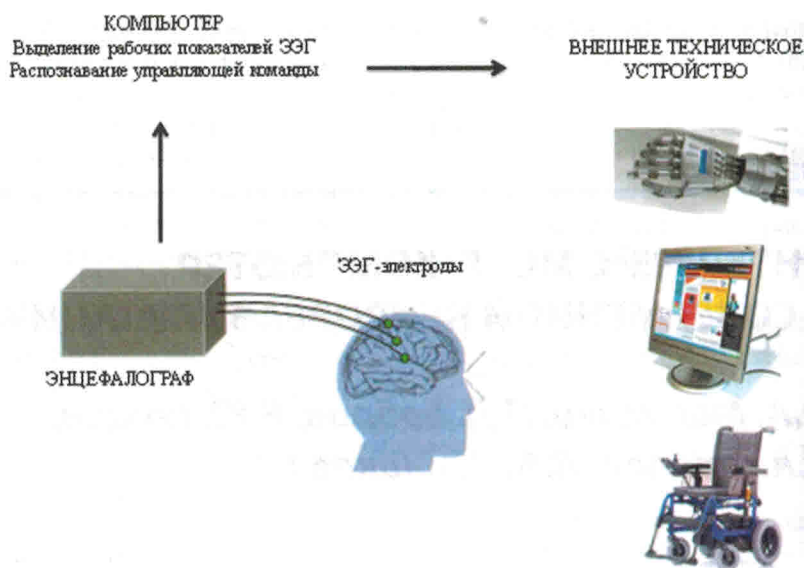


Рис. 9.1. Общая схема системы интерфейс мозг–компьютер на примере ЭЭГ-ИМК

Основные характеристики интерфейсов в зависимости от метода регистрации сигналов активности мозга представлены в *табл. 9.1*.

Таблица 9.1

Характеристики интерфейсов в зависимости от метода регистрации сигналов активности мозга [Nicolas-Alonso L.F. et al., 2012]

Характеристики	Метод регистрации сигнала					
	Внутрикорковые чипы	ЭКоГ	ЭЭГ	МЭГ	фМРТ	NIRS
Тип сигнала, г/м	Электрический			Магнитный	Метаболический	
Определение сигнала активности, г/м	Прямое				Непрямое	
Временное разрешение, с	~ 0,003	~ 0,003	~ 0,05	~ 0,05	~ 1	1
Пространственное разрешение, мм	От ~ 0,05 до ~ 0,5	~ 1	~ 10	~ 5	~ 1	~ 5
Инвазивность метода	Инвазивный			Неинвазивные		
Портативность метода	Портативный			Непортативный		Портативный

В последние годы ИМК активно разрабатывают для применения в нейрореабилитации [Shih J.J. et al., 2012; Мокиенко О.А. и др., 2011]. Существует два основных направления разработки интерфейсов для этой цели. Первое направление касается разработки так называемых вспомогательных (*assistive*) интерфейсов, которые могут оказаться единственным каналом общения с окружающим миром для больных с выраженными двигательными нарушениями конечностей или мимической мускулатурой (при постинсультном или посттравматическом парезе, боковом амиотрофическом склерозе и др.). Такие интерфейсы могут позволить пациентам управлять

роботизированным протезом руки, инвалидной коляской, функциональной электростимуляцией (ФЭС), специфически активирующей парализованные мышцы, и прочими внешними техническими устройствами.

В последнее время особое внимание уделяется разработке другого направления применения ИМК, так называемых восстановительных (*restorative*) интерфейсов, которые могут способствовать восстановлению нарушенных двигательных функций путем реорганизации областей коры головного мозга. Внедрение восстановительных ИМК в клиническую практику тесно связано с развитием и успехами технологии биологической обратной связи и ее использованием для целенаправленного афферентного или эфферентного регулирования мозговой деятельности. При использовании интерфейсов с биологической обратной связью в режиме реального времени пользователь получает визуальную, слуховую или тактильную информацию об активности своего головного мозга и при этом может добровольно изменить, например, определенный паттерн ЭЭГ.

9.1.1. Инвазивные ИМК

В середине 90-х годов XX века, после многолетних экспериментов на животных, начались исследования по применению ИМК для восстановления слуха, зрения или двигательных функций у людей. При этом для восстановления зрительной или слуховой функции использовались ИМК, обеспечивающие одностороннюю передачу информации от компьютера к мозгу, а для реабилитации двигательной функции — от мозга к компьютеру.

Исследователи из Университета Эмори в Атланте P.R. Kennedy и соавт. в 1998 г. впервые установили имплантат в головной мозг человека с целью восстановления двигательной функции. Пациентке, страдающей боковым амиотрофическим склерозом с синдромом *locked-in*, в кору головного мозга были вживлены электроды и в течение нескольких месяцев производилась запись активности нейронов ее головного мозга. Пациентка смогла контролировать нейронные сигналы, передавая тем самым команды внешнему устройству. Это были сигналы по типу включение/выключение (с одной степенью свободы). Данное исследование стало важным шагом в поиске методов, предоставляющих пациентам с синдромом *locked-in* возможность управлять окружающими их объектами. Кроме того, исследователи показали, что с помощью ИМК, подавая сигнал от мозга к стимулятору мышцы (электромиостимуляция), возможна активация движений в парализованной конечности.

В 2005 г. двум пациентам с тетраплегией в первичную моторную кору были имплантированы чипы BrainGate, состоящие из 96 микроэлектродов и разработанные фирмой Cyberkinetics Neurotechnology под руководством Джона Донохью [Hochberg L.R. et al., 2006] (рис. 9.2). Было показано, что даже через 3 года после травмы спинного мозга намерение совершить движение рукой модулирует импульсную активность нейронов. Исследователями были разработаны декодирующие устройства, предоставляющие возможность «нейронным курсором» открывать электронную почту и управлять телевизором. Кроме того, после нескольких тренировок пациенты с тетраплегией при помощи интерфейса могли манипулировать протезом руки и выполнять элементарные действия с многосуставной роботизированной рукой [Hochberg L.R. et al., 2006].

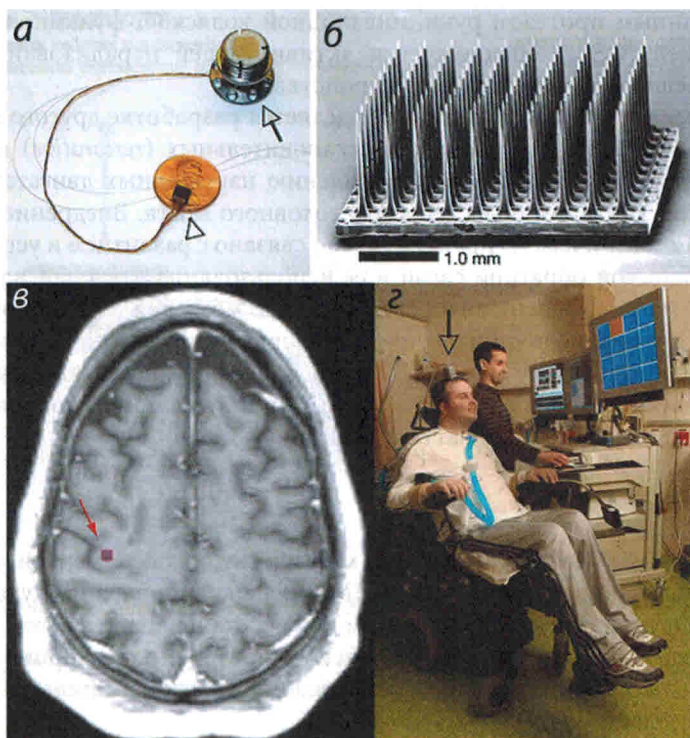


Рис. 9.2. Инвазивный интерфейс мозг–компьютер: а — датчик BrainGate; б — микрофотография датчика с электродами; в — место имплантации датчика (прецентральная извилина); г — пациент с тетраплегией, которому впервые была вживлена система BrainGate (no L.R. Hochberget u соавт., 2006)

Результаты этих исследований показали, что протезы, управляемые активностью нейронов коры головного мозга, могли бы стать новыми ценными нейротехнологиями для повышения степени независимости людей с тетраплегией.

В исследованиях менее инвазивного подхода — эпидурально имплантированной сети ЭКоГ-электродов — было показано, что для обучения управлению перемещения курсора с помощью такого интерфейса требуется всего несколько минут [Freeman W.J. et al., 2000; Leuthardt E.C. et al., 2004]. Основанный на ЭКоГ интерфейс, кроме высокого топографического разрешения, обладает хорошим соотношением сигнал/шум [Ball T. et al., 2009; Freeman W.J. et al., 2000; Staba R.J. et al., 2002]. Количество степеней свободы, которое можно достичь с помощью ЭКоГ-сети путем декодирования потенциалов локального поля, связанных с движением, является предметом исследований.

9.1.2. Неинвазивные вспомогательные и восстановительные ИМК

Выделить сигналы мозга и расшифровать их в режиме реального времени с помощью неинвазивных методов регистрации активности мозга — весьма трудная, но выполнимая задача. Средняя скорость передачи данных, достигаемая при неинвазивном ИМК у людей, колеблется в пределах 5–25 битов/мин [Kubler A. et al.

2001], то есть в минуту может быть правильно классифицировано до 25 бинарных (да/нет) выборов.

Сигналом для неинвазивных ИМК обычно является многоканальная электроэнцефалограмма (ЭЭГ), то есть электрический потенциал, регистрируемый на поверхности головы. Предпосылкой для создания ИМК, основанных на регистрации ЭЭГ, являются ранние работы, показывающие, что человек и животные в состоянии научиться с помощью биологической обратной связи произвольно контролировать электроэнцефалографические ритмы. В 60–70-е годы эта способность была продемонстрирована для альфа-ритма у человека [Nowlis D.P. et al., 1970], для сенсомоторного ритма у кошек [Wyricka W. et al., 1968] и человека [Serman M.B. et al., 1974] и гиппокампального тета-ритма у собак [Black A.H., 1971].

Имеются работы, в которых ИМК был реализован на основе обработки сигнала магнитоэнцефалограммы (МЭГ) [Buch E. et al., 2008], на основе функциональной магниторезонансной томографии (фМРТ) [Weiskopf N. et al., 2003] и на основе спектроскопии в околоинфракрасном диапазоне [Sitaram R. et al., 2009]. Источником МЭГ являются те же биотоки мозга, которые создают электрические потенциалы, поэтому ИМК, основанные на МЭГ, используют те же показатели активности мозга, что и ИМК, основанные на ЭЭГ и ЭКоГ. В ИМК, основанных на фМРТ и околоинфракрасной спектроскопии, используется гемодинамический ответ, характеризующий изменение локального кровотока при повышении активности сопряженной области мозга. ИМК, основанные на регистрации МЭГ и гемодинамического ответа, требуют использования приборов, которые на порядки дороже, чем для регистрации ЭЭГ.

В качестве показателей активности мозга в основанных на регистрации ЭЭГ интерфейсах используются зрительные вызванные потенциалы, медленные корковые потенциалы, компонент P300, паттерны ЭЭГ, соответствующие различным типам ментальной деятельности, и сенсомоторные ритмы мю и бета.

Зрительные потенциалы. Первый ИМК, использующий зрительные потенциалы для формирования команды внешнему устройству, был предложен еще в начале 70-х годов [Vidal J.J., 1973]. В этом ИМК регистрировалась затылочная ЭЭГ, соответствующая активности зрительной коры. ИМК был основан на эффекте зависимости ЭЭГ от направления взгляда. Выделяя из ЭЭГ компоненту, определяющую направление взгляда, можно было сдвигать курсор монитора в ту точку, куда испытуемый произвольно направлял взор.

Также аналогичный ИМК описал в своей работе Е.Е. Sutter в 1984 г. Перед испытуемым была матрица из 8×8 ячеек, в которых находились буквы. По инструкции испытуемый смотрел на букву, какую он произвольно выделял. Буквы были объединены в группы так, что каждая буква входила в несколько групп. Группы из букв по очереди мерцали с частотой 40–70 р/с. Измерялась амплитуда зрительного вызванного потенциала (ЗВП) примерно через 100 мс после начала мерцаний каждой из групп. Амплитуда была выше, если мерцала группа, куда входила буква, на которую смотрел испытуемый. Статистический анализ амплитуд позволял с большой точностью распознавать эту букву. Испытуемым удавалось таким образом «диктовать» 10–12 слов в минуту. Такая система была использована для реабилитации одного полностью обездвиженного больного.

Другой способ использования ЗВП для ИМК был предложен в работе М. Middendorf и соавт. (2000). В этом ИМК на экране одновременно мерцало несколько