

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

С. Н. Костромина

ВВЕДЕНИЕ  
В НЕЙРОДИДАКТИКУ

*Учебное пособие*



ИЗДАТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УДК 159.953;37.026

ББК 74.202

К72

Рецензенты: д-р психол. наук, проф., зав. каф. возрастной психологии и педагогики семьи *В. Л. Ситников* (Рос. гос. пед. ун-т им. А. И. Герцена), д-р психол. наук, проф., зав. каф. психологии *С. М. Шингаев* (С.-Петербург. акад. постдипломного образования)

*Рекомендовано к печати*

*Учебно-методической комиссией факультета психологии  
Санкт-Петербургского государственного университета*

**Костромина С. Н.**

К72 Введение в нейродидактику: учебное пособие. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та. 2019. — 182 с.

ISBN 978-5-288-

В пособии представлены современные фундаментальные и прикладные исследования нейрофизиологических оснований образовательного процесса, результаты которых прямо или косвенно оптимизируют процессы преподавания и обучения. Главы содержат сведения о структурно-функциональной организации головного мозга (на макро- и микроуровнях), о нейрональных механизмах психологических оснований обучения (особенностях восприятия, внимания, памяти, формирования универсальных учебных действий), о нейрофизиологических закономерностях овладения письмом, чтением, иностранной речью и математическими умениями.

Книга предназначена для студентов и аспирантов факультетов психологии и педагогики, специалистов сферы образования, готовых применять результаты нейропсихологических и нейрофизиологических исследований в методических целях.

УДК 159.953;37.026

ББК 74.202

ISBN 978-5-288

© Санкт-Петербургский  
государственный  
университет, 2019  
© С. Н. Костромина, 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	5
<b>Глава 1. Нейродидактика как научная дисциплина .....</b>	<b>7</b>
1.1. Предмет и задачи нейродидактики. Нейродидактика в системе наук. Нейромифы и образовательная практика .....	—
1.2. Принципы нейродидактики.....	11
1.3. Основные разделы нейродидактики .....	13
Использованная литература.....	16
<b>Глава 2. Современные представления о функциональной топографии головного мозга .....</b>	<b>17</b>
2.1. Структурно-функциональная модель интегративной работы головного мозга.....	59
2.1.1. Нейрональная организация психических функций .....	19
2.1.2. Поля Бродмана .....	23
2.2. Нейронное обеспечение психической активности .....	33
2.3. Развитие головного мозга в онтогенезе .....	41
2.4. Современные нейрофизиологические методы неинвазивного изучения мозга человека .....	45
Использованная литература.....	55
<b>Глава 3. Нейрофизиологические механизмы когнитивных и метакогнитивных процессов усвоения учебной информации .....</b>	<b>56</b>
3.1. Сенсорные системы.....	59
3.2. Системы внимания .....	64
3.3. Системы памяти .....	72
3.4. Исполнительные функции и универсальные учебные действия .....	80
3.4.1. Метакогнитивный аспект обучения: универсальные учебные действия .....	81
3.4.2. Исполнительные функции как нейрофизиологическая основа учебной деятельности .....	88
3.4.3. Структуры и содержание исполнительной системы мозга...	90

## 4 Оглавление

3.4.4. Репрезентация сложных умственных действий .....	95
3.4.5. Роль исполнительской системы в обучении .....	105
3.4.6. Среда и социальное окружение как факторы становления исполнительской системы .....	112
Использованная литература .....	119
<b>Глава 4. Нейрофизиологические основы обучения чтению, математике, родному и иностранному языкам.....</b>	<b>120</b>
4.1. Нейрофизиологические механизмы освоения родного и иностранного языков.....	—
4.2. Нейрофизиологические основания чтения и письма.....	127
4.3. Нейрофизиологические особенности формирования математических умений .....	137
4.4. Нейродидактические основы обучения .....	143
Использованная литература .....	159
<b>Заключение .....</b>	<b>160</b>
<b>Литература .....</b>	<b>161</b>
<b>Приложение.....</b>	<b>177</b>

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В жизни человека обучение занимает особое место. Основной смысл любого обучения — это познание окружающей действительности, познание себя и других.

Человек обладает способностью к обучению благодаря особенностям своего мозга, у которого есть врожденные функции категоризации и структурирования. Если младшим школьникам нужно объяснять принцип вычисления в двух разных моделях — двоичной и десятичной, то старшие школьники и студенты способны самостоятельно обнаружить заложенные в модель алгоритмы и правила, проанализировав примеры. Закономерности работы мозга позволяют нам систематизировать получаемую информацию, анализировать ее, сопоставлять и сравнивать, обобщать и выводить новые правила, работать с символами и образами, регулировать учебную деятельность и управлять ею. Сегодня наука накопила достаточно данных о специфике восприятия зрительной и слуховой информации, об особенностях запоминания и хранения информации, оперирования ею, усвоения родной и иностранной речи, работы математических систем, об изменениях функциональной активности мозга в ситуации повышенного напряжения и ограниченного времени.

Как интегративная дисциплина нейродидактика объединяет в себе многочисленные теоретические идеи и эмпирические данные о закономерностях работы мозга в ситуации обучения. Цель нейродидактики — не только обобщить эти сведения, но и представить их в той форме, чтобы обучение шло максимально эффективно. Совершенно естественно, когда учебный процесс строится с учетом закономерностей функциональной активности головного мозга, нейрофизиологических основ процессов восприятия, памяти, внимания и мышления. В связи с этим основная цель учебного курса по нейродидактике — формирование представлений о нейрофизиологических механизмах работы мозга, определяющих способность человека познавать и учиться.

Основными задачами учебной дисциплины «Нейродидактика» выступают:

- знакомство с современными психологическими, педагогическими, нейрофизиологическими и другими научными данными отечествен-

ных и зарубежных нейроисследований, результаты которых прямо или косвенно оптимизируют процессы преподавания и учения;

- формирование целостного представления о структурно-функциональной организации мозговых процессов, которые имеют место в рамках сложной умственной деятельности (счета, чтения, письма и др.) в ходе обучения;
- развитие умения применять результаты нейропсихологических и нейрофизиологических исследований с целью оптимально организовать учебный процесс, раскрыть когнитивный потенциал учащихся, успешно конструировать и модернизировать современные образовательные технологии;
- психолого-педагогическое сопровождение образовательного процесса с целью повысить его познавательную и аффективную составляющие, способствовать формированию самостоятельной научной и творческой деятельности.

Учебное пособие состоит из четырех глав, включающих теоретические материалы по основным вопросам дисциплины, материалы для контроля знаний, иллюстративные материалы. В первой главе рассматривается нейродидактика как научное направление. Вторая глава содержит современные представления о структурно-функциональной организации головного мозга на макро- и микроуровнях. В третьей главе анализируются нейрональные механизмы психологических оснований обучения: особенности восприятия, внимания, памяти, формирования универсальных учебных действий (исполнительной системы процесса обучения). Четвертая глава раскрывает нейрофизиологические закономерности овладения письмом, чтением, иностранной речью и математическими умениями.

Исследование проведено в рамках поддержанного РГНФ научного проекта № 14-06-00521 «Нейропсихологические механизмы сложных видов интеллектуальной деятельности, формирующихся в процессе обучения у студентов»

# Глава 1

## Нейродидактика как научная дисциплина

### 1.1. Предмет и задачи нейродидактики.

#### Нейродидактика в системе наук.

#### Нейромифы и образовательная практика

Сегодня нейродидактика — это относительно молодая междисциплинарная область научного знания, где результаты исследований мозга и закономерностей его функционирования используются с целью найти наиболее эффективные принципы и методы организации учебного процесса. Термин «нейродидактика» (*Neurodidaktics*) предложен Герхардом Прайсом, специалистом по дошкольному математическому образованию, в 1988 году<sup>1</sup>. Для того чтобы подчеркнуть междисциплинарность новой области исследований, Прайс попытался объединить результаты исследований в нейронауке, дидактике, психологии, теории обучения и других смежных дисциплинах (рис. 1.1).

Связующим звеном между нейронаукой и педагогической практикой представляется психология, а точнее психология образования и психология развития, поскольку последняя позволяет объединить не только деятельность мозга и обучение, но и разумную активность человека (познание), рассмотреть человека как субъекта познания в ситуации обучения. Поле исследований психологии пересекается с таковым нейронауки (проблемы тревожности, стресса, познавательной деятельности, творчества и т. д.) и образованием (трудности обучения, взаимодействие в группе и др.) [Костромина, Бордовская, Искра и др., 2015]. Посредством описания когнитивных процессов, особенностей работы сознания, эмоционально-волевой регуляции учебной деятельности психология позволяет оценить и оптимизировать эффективность образовательного процесса. Психология изучает явления, которые

---

<sup>1</sup> Термин «нейродидактика» главным образом характерен для Германии и немецкоговорящих стран. В англоязычной среде используются понятия «нейропедагогика» (*Neuropedagogy*), «нейрообразование» (*Educational Neuroscience*), «мозг-ориентированное обучение» (*Brain-based learning*) или «мозг, разум и образование» (*Mind, Brain & Education Science*).

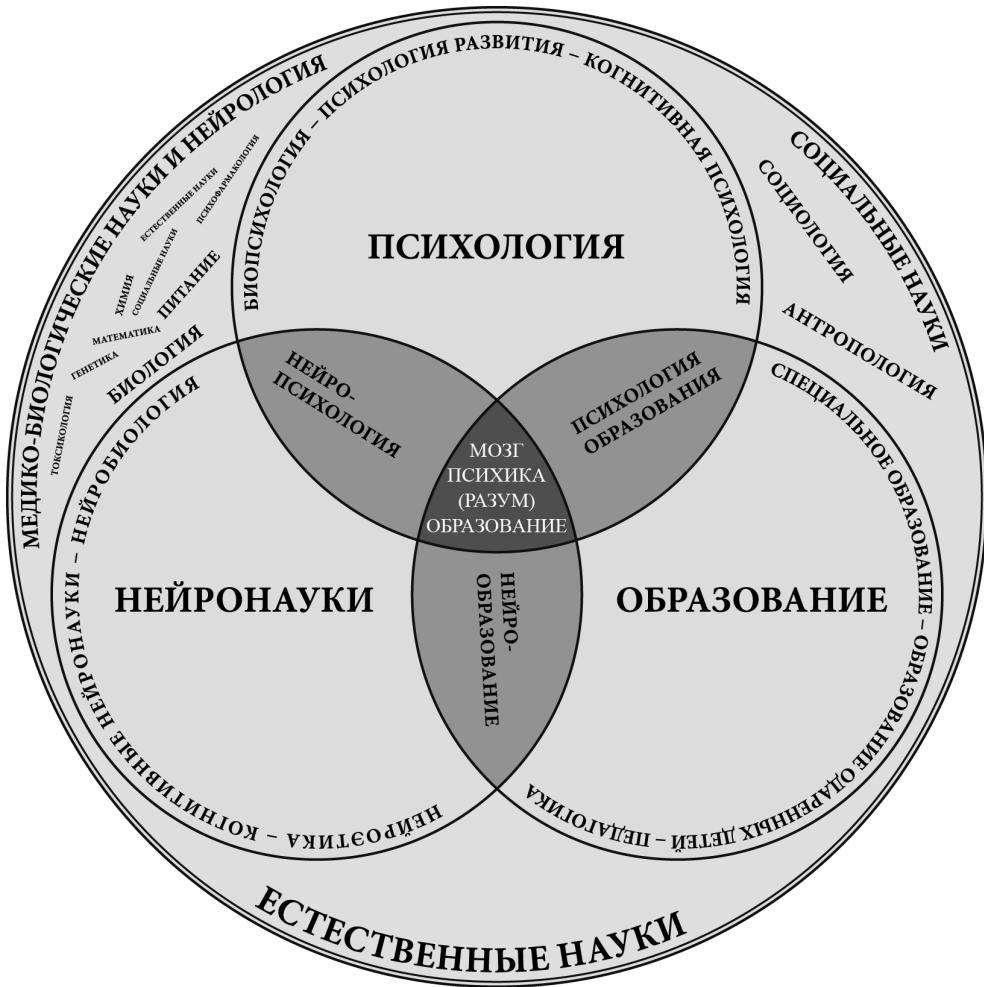


Рис. 1.1. Проблемное поле исследований [Sabitzer, Pasterk, 2014]

оказываются следствием мозговой активности и причиной успешного/неуспешного обучения, адаптивного/дезадаптивного поведения в классе, эффективной/неэффективной коммуникации со взрослыми и сверстниками. В качестве связующего звена психология создает условия для реализации междисциплинарного подхода к решению самых сложных проблем в образовании. Например, исследование нейрофизиологических механизмов дислексии привело к тому, что стали понятны трудности в обучении чтению, удалось создать конкретные программы эффективного обучения чтению и письму школьников с такими проблемами. Сегодня основные принципы и результаты исследований в областях нейронауки, психологии развития



и когнитивной науки используются для создания программного обеспечения и образовательных инструментов при обучении чтению и письму. Исследования эмоций, принятия решений и социального функционирования также помогают понять роль эмоциональной составляющей в процессе обучения. Таким образом, предметом нейродидактики являются закономерности функциональной активности мозга, обеспечивающие максимальную эффективность обучения в разных дидактических условиях.

Согласно нейрокогнитивной теории обучения, в нейродидактике синтезируются три самостоятельных направлений исследования:

- нейрофизиология, которая фокусируется на биологических основах головного мозга и нервной активности;
- когнитивная наука, изучающая обработку информации и внутреннюю репрезентацию опыта;
- теория обучения, которая объясняет, как мы в целом взаимодействуем с нашим окружением и адаптируемся к нему [Anderson, 1999].

Со временем нейроисследований, связанных с образовательным процессом, становится все больше, но пока это научное направление не сложилось как научная система с теоретико-методологическим основанием и прикладными направлениями. Сегодня могут быть выделены следующие актуальные задачи нейродидактики:

- введение в программы обучения психологов и педагогов курсов по когнитивной нейронауке, раскрывающих не только мозговые механизмы когнитивного функционирования, но и типичное и атипичное развитие учебных навыков, роль обучения и культуры в развитии мозга и др.;
- более активное обсуждение возможностей и ограничений поведенческих и инструментальных методов изучения мозга с целью предотвратить неправомерное использование научных данных;
- междисциплинарные исследования, предусматривающие сотрудничество нейробиологов, психологов и педагогов-исследователей [Костромина, Бордовская, Искра и др., 2015].

В системе образования существует «информационный запрос» на сведения о работе мозга. Ей катастрофически не хватает современных знаний о закономерностях функционирования мозга при решении когнитивных, творческих, алгоритмических задач. Имеется специализированная литература, которая предназначена для нейрофизиологов и не всегда доступна специалистам в сфере образования, и популярная литература, которая провоцирует формирование некорректных представлений. В педагогической практике инструменты и границы применения нейрофизиологических исследований не всегда понятны, их данные зачастую излишне упрощаются и неправильно

тракуются. Перед самими нейрофизиологами не ставится задача интегрировать результаты своих исследований в реальную практику, значительная часть экспериментов далека от учебной ситуации, не учитывает актуальный запрос системы образования, исключает множество факторов, так или иначе влияющих на процессы обучения и его качество.

Некорректное распространение результатов нейронауки в педагогику зачастую приводит к формированию мифов, следование которым не только бесполезно, но и может быть опасным для обучающихся. Например, у современных учителей сложилось представление о том, что левое полушарие определяет работу языка, логики, операции с математическими формулами, числовыми рядами, алгоритмами, способность к анализу и не связано с фактической информацией, тогда как правое полушарие мозга отвечает за фантазирование, ориентацию в пространстве, восприятие и обработку форм и образов, ритмов, изображений, установление межличностных взаимоотношений. Многие преподаватели стараются обеспечивать баланс межполушарной активности или определить «доминирующее полушарие», чтобы предотвратить «несоответствие» между когнитивными особенностями работы мозга ученика и его образовательным опытом. Данный пример мифа о нейрофизиологии с чрезмерным акцентом на специализации полушарий [Goswami, 2007] был признан таковым еще в 2002 году в докладе Организации по экономической кооперации и развитию (Organisation for Economic Co-operation and Development) на основе результатов многочисленных исследований с использованием методов электроэнцефалографии и нейровизуализации.

Таким же мифом является преувеличение роли ведущего канала восприятия и переработки информации. В некоторых работах после определения ведущего канала рекомендуется предложить детям носить значок с буквой В, А или К с указанием стиля обучения [Bruer, 1997]. И педагоги стремятся разделить детей на аудиалов, визуалов и кинестетиков и построить учебный процесс соответствующим образом.

Существует миф о критических для обучения периодах, соответствующих синаптогенезу [Bruer, 1997]: если в критический период мозг ребенка не будет получать необходимое количество стимуляции, то впоследствии он не будет работать должным образом, поскольку возможность для развития окажется упущена. Согласно мифу, обучение будет успешнее, если совпадет с периодом синаптогенеза [Understanding the brain, 2002]. Соответственно, предлагается синхронизировать образовательные мероприятия с периодом увеличения плотности синапсов и проводить их так, чтобы они способствовали нейропластичности. Предложение специалистов сводится к максимальному стимулированию и развитию умственной деятельности в возрасте до 3 лет, когда образуется 70 % синаптических связей. Как следствие, на родителей и учителей обрушивается вал рекламы тренинговых пакетов «гим-

настики для мозга (ума)», призванных гарантировать «настоящее образование» [Cohen, Goldsmith, 2000]. Как грибы после дождя, появляются центры раннего развития со специализированными обучающими когнитивными программами, где предлагается повысить качество обучения на основе ряда простых упражнений для объединения активности всех сфер мозга. К сожалению, практически во всех случаях эти программы не имеют доказательной базы относительно реальной перестройки нейрональных связей в результате раннего обучения.

Для преодоления сложившейся ситуации необходимы нейродидактические исследования на основе синтеза междисциплинарного и нейропсихологического подходов с опорой на ресурсы других научных областей (биологии, нейронауки, психологии, когнитологии и др.). В Санкт-Петербургском государственном университете уже сегодня проводится комплекс исследований в области нейродидактики, который позволит прийти к пониманию нейрофизиологических механизмов сложных видов умственной деятельности, обеспечивающих решение ключевых для образования проблем — усвоения учебной информации и управления учебной активностью.

## 1.2. Принципы нейродидактики

Принципы нейродидактики основаны на фундаментальных положениях нейронауки. Так, мозг является материальным субстратом психики и поведения человека. Ему свойственна природная (врожденная) любознательность, которая подталкивает его к исследовательской активности и приобретению нового опыта. В организации мозговой деятельности отмечается как генетическая общность, так и индивидуальная вариативность. Ключевым механизмом научения и хранения информации (запоминания) на нейронном уровне является пластичность. Свойство пластичности позволяет формировать разнообразные комбинации и алгоритмы функционирования нейронных сетей. Чем сложнее и гибче нейронные ансамбли, которые может образовывать мозг, тем выше интеллектуальные возможности человека. Полноценный процесс формирования новых связей между нейронами человека требует социального взаимодействия, опыта обучения, творческой деятельности.

Принципы обучения, «ориентированного на мозг», или нейродидактики, таковы:

- **Пластичность** — способность нервных клеток работать с разной интенсивностью, образовывать сложные нейронные ансамбли с вовлечением различных функциональных участков мозга, изменять параметры своей работы в зависимости от многих факторов внешней и внутренней среды, перестраивать и достраивать необходимые звенья нейронной сети при решении задачи нового типа.

- **Природная (врожденная) любознательность** — стимул к исследовательской активности уже в раннем возрасте (с первых месяцев), в течение всей жизни является движущей силой развития.
- **Генетическое единство основных механизмов функционирования нервной системы человека.** У всех людей, как представителей одного биологического вида, генетические особенности нервной системы во многом сходны, но имеют значительные индивидуальные различия.
- **Влияние индивидуального опыта, полученного в течение жизни.** Опыт раннего детства в соединении с генетически обусловленным развитием влияет на формирование нейронных сетей, обеспечивающих функционирование психики. В течение всей жизни они меняются под влиянием обучения, социокультурных воздействий и т. д. Значительный вклад вносят характеристики окружающей среды, которые способны вызвать изменения на уровне организации нейронных сетей. Развивающая среда, специальная организация обучения способствуют развитию функций головного мозга. Результаты исследований позволяют рассматривать социально-экономический статус как предиктор развития речевой функции и исполнительных функций [Hackman, Farah 2008]. Уже в возрасте 3 лет дети из более обеспеченных семей говорят лучше, чем дети из семей с низким социальным статусом. По данным нейровизуализационных исследований, в возрасте 6–9 лет у детей из обеспеченных семей имеет место большая зрелость структур мозга, ответственных за фонологическое сознание (веретенообразная извилина), чем у детей из малообеспеченных семей. То же самое касается эффективности деятельности лобных отделов мозга по данным исследования ЭЭГ исполнительных функций (исследовалось селективное внимание), хотя на поведенческом уровне результаты активности лобных отделов были одинаковыми [Hackman, Farah, 2008]. Опыт депривации, дистресса, заболевания, употребление психоактивных веществ могут вызвать задержку развития и даже деструктивные изменения мозга. Физиологические аспекты, например особенности питания, гормональный статус и т. п., влияют на обучаемость и развитие когнитивной и эмоциональной сфер.
- **Обучение умственной деятельности сложного уровня.** Любые проявления интеллекта отражают предыдущий опыт активации и функционирования синаптических связей и нейронных сетей. Развитию интеллекта способствуют сложные виды умственной деятельности (установление причинно-следственных связей, целеполагание, планирование, решение сложных задач). Поэтому применение дедуктивного

мышления, проявление креативности облегчаются, когда человек часто решает подобные задачи;

- **Систематичность, регулярность, повторяемость и эмоциональное воздействие содержания обучения на учащегося.** Стойкая связь между нейронами и, соответственно, устойчивость определенных поведенческих реакций зависят от частоты и регулярности повторения воздействий. Лучше запоминаются события, имеющие яркую эмоциональную окраску. В процессе обучения нужно не только воздействовать на познавательную деятельность учащихся, но и эмоционально вовлекать их в процесс учения, стремиться поддерживать позитивную эмоциональную атмосферу в ходе обучения [Dubinsky, Roehrig, Varma, 2013].

Корректное использование фундаментальных открытий нейронауки в процессе обучения позволяет создать оптимальные условия для развития мозга, его защиты, более эффективного применения его ресурсов во время обучения. Обучение, ориентированное на мозг, способствует психическому и физическому здоровью обучающихся и успешному преодолению трудностей в обучении.

### 1.3. Основные разделы нейродидактики

Согласно теоретической модели, объединяющей нейронауку и обучение [Tommerdahl, 2010], можно выделить основные уровни этого синтеза (рис. 1.2).

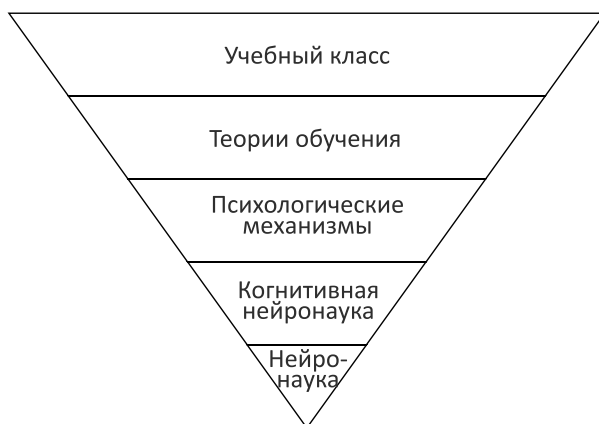


Рис. 1.2. Модель синтеза нейронауки и обучения [Tommerdahl, 2010, p. 99]

Нижний, или первый, уровень составляют исследования головного мозга на клеточном уровне, в том числе разнообразных физиологических и биохимических процессов в нервных тканях.

Второй уровень образует когнитивная нейронаука, в которой объектом исследования является структурно-функциональная организация нейронов в сеть с целью сформировать механизмы, которые отвечают за определенные действия, такие как восприятие речи, извлечение слов или рабочая память [Gazzaniga, 2004]. Для когнитивной нейронауки существенны вопросы о том, как мозг учится, что делает наш опыт осознанным и что выступает основой уникальных когнитивных возможностей человеческого мозга по отношению к другим простым организмам [McClelland, 2001]. Поводом для постановки эти вопросов послужила роль обучения в работе нейромодуляторных механизмов головного мозга. Однако подробные нейромодуляции и синхронизации требуют дополнительного исследования. В настоящее время не до конца понятно, каким образом активность мозга приводит к осознанной когнитивной деятельности.

На третьем уровне взаимосвязь психологических механизмов и когнитивной нейронауки раскрывает, каким образом на основе нейронной организации головного мозга возникают и протекают процессы внимания, памяти, умозаключений и т. п. [Tommerdahl, 2010].

Четвертый уровень образуют развитие и совершенствование теорий обучения исходя из результатов нейрокогнитивных и психологических исследований, то есть сопрягаются данные нейронауки, психологии и специализированных педагогических знаний о процессе учения. На этом же уровне предстоит оценивать эффективность педагогической практики в контексте установленных когнитивных и нейрофизиологических механизмов, тщательно изучать разработанные теории с целью оценить эффективность новых методов по сравнению с имеющимися.

На четвертом уровне, в учебном классе, доказательные методы и технологии должны быть апробированы и внедрены. Там же проходит тестирование разработанных программ на предмет их эффективности [Tommerdahl, 2010].

Описание уровней взаимодействия нейронауки, психологии и педагогической практики уже позволяет структурировать общие векторы развития нейродидактики, хотя нейродидактика как научная дисциплина находится еще в стадии формирования, ее содержательные разделы только оформляются.

Для сферы образования наибольший интерес представляют нейрофизиология познавательной деятельности, нейрофизиологические механизмы метапознания (систем управления, регуляции учебной деятельности), предметная нейродидактика, нейрофизиологические основы трудностей в обучении.

**Нейрофизиология познавательной деятельности.** Благодаря исследованиям складываются условия для раскрытия нейрофизиологических механиз-

мов формирования когнитивных процессов с учетом специфики возрастного развития. Результаты фундаментальных исследований морфофункционального созревания мозга, функционирования динамических систем нейронных сетей, являющихся нейрофизиологической основой различных видов восприятия, внимания, памяти, вербальной и зрительно-пространственной деятельности, в зависимости от возраста могут быть использованы как объективные критерии для оценки функциональных возможностей ребенка в ходе обучения.

**Нейрофизиологические механизмы метапознания (системы управления, регуляция учебной деятельности).** Богатый опыт исследований нейрофизиологических оснований когнитивных процессов и исполнительных системы мозга позволил «выйти» на изучение метакогнитивных процессов. У детей 6–7 лет проявляется способность к метакогнитивной регуляции, когда различные участки мозга выполняют свои функции в соответствии с целями и задачами деятельности и под сознательным контролем. Ведущую роль в системной организации множества одновременно протекающих процессов играют лобные доли полушарий головного мозга и их взаимосвязи с другими отделами коры и подкорковыми центрами. В настоящее время нейрофизиологические механизмы метапроцессов целеполагания, планирования, когнитивного контроля исследуются в рамках концепции исполнительных функций.

**Предметная нейродидактика.** Вышеперечисленные направления исследований дают представление об общих, универсальных мозговых механизмах, лежащих в основе когнитивного и метакогнитивного функционирования. Однако каждая учебная дисциплина имеет свою специфику. Поэтому важно рассматривать методику преподавания, подготовку учебно-методических материалов с учетом механизмов тех аспектов когнитивных функций, которые задействованы в освоении конкретного предмета: математики, чтения, родного и иностранного языка и т. д. Пока такие исследования достаточно разрозненны и узконаправленны. Систематизация данных позволила бы наметить критерии, основанные на объективных закономерностях работы мозга, для экспертизы учебных программ, учебников, предлагаемых методов обучения.

**Нейрофизиологические основы трудностей в обучении.** Проблема слабоуспевающих учащихся всегда актуальна. Педагоги и психологи мало знают о нейрофизиологии когнитивных процессов и обучения, а потому сводят работу с детьми, испытывающими трудности в обучении, к дополнительным занятиям, выполнению большего количества упражнений и т. д., применению психокоррекционных методик без учета специфики проблемы учащегося. При этом дефект когнитивной функции сохраняется и оказывает негативное воздействие на развитие ребенка. Важным прикладным направлением нейродидактики могла бы стать разработка физиологически обоснованных методик коррекции различных учебных проблем, в том числе с применением игровых компьютерных технологий, биологической обратной связи.

Таким образом, особенности нейродидактики определяют, с одной стороны, специфика учебной дисциплины (например, язык, математика, информатика), а с другой — характер компетенций, общих для нескольких предметных областей с единым методическим обоснованием (например, проблемно ориентированное обучение или технология критического мышления).

Напомним, результаты нейробиологических исследований не могут быть буквально транслированы в образовательную практику. Ключевая задача нейродидактики — информировать о том, «как мозг учится», оптимизировать обучение и преподавание, принимая во внимания данные нейронауки, психологии и образования. Далее мы рассмотрим некоторые теоретические подходы и практические рекомендации для повышения эффективности преподавания.

### Контрольные вопросы и задания

1. Какова предметная область нейродидактики?
2. Как задачи нейродидактики соотносятся с ее принципами?
3. Сформулируйте основные задачи нейродидактики.
4. Опишите место нейродидактики в системе наук.
5. Объясните основные принципы нейродидактики.
6. Охарактеризуйте основные разделы нейродидактики.

### Использованная литература

1. *Костромина С. Н., Бордовская Н. В., Искра Н. Н. и др.* Нейронаука, психология и образование: проблемы и перспективы междисциплинарных исследований // Психологический журнал. 2015. Т. 36, № 4. С. 61–70.
2. *Dubinsky J. M., Roehrig G., Varma S.* Infusing neuroscience into teacher professional development // Educational Researcher. 2013. Vol. 42, No. 6. P. 317–329.
3. *Goswami U.* Neuroscience and education: from research to practice? // Nature Review Neuroscience. 2007. No. 7. P. 406–413.
4. *Hackman D. A., Farah M. J.* Socioeconomic status and the developing brain // Trends in Cognitive Sciences. 2008. Vol. 13, No. 2. P. 65–73.
5. *Understanding the brain: Toward a new science / Organization for Economic Co-operation and Development.* Paris, 2002.



## Глава 2

# Современные представления о функциональной топографии головного мозга

Современные представления о психической деятельности человека базируются на знаниях о структурно-функциональной организации головного мозга. Каждая структурная единица (область, зона, отдела) несет определенную функциональную нагрузку, отвечает за способность к психической активности в той или иной форме. Понимание роли функции в общей системе — это ключ к раскрытию внутренней сущности объекта, проникновение в его структуру. Еще А. А. Ухтомский рассматривал психологическое бытие человека как выражение структуры и деятельности «функционального органа», П. К. Анохин — как функциональной системы. Реализация функции зависит не только от содержания, но и от структуры предмета в целом. Функция структуры — это не столько происходящие в ее содержании процессы, сколько ее управляющее воздействие на низшие, входящие в нее элементы, взаимодействие с соседними однопорядковыми структурами и со структурами высшего, интегрирующего и координирующего порядка. Таким образом, функция структуры определяется содержанием и строением данной структуры, функциональными связями и отношениями с другими структурами и системами организма. Соответственно, и сама структура не может быть ограничена только совокупностью элементов, то есть частью содержания [Гиляревский, Тарасов 1973, с. 132].

### 2.1. Структурно-функциональная модель интегративной работы головного мозга

Общие закономерности работы мозга как единого целого могут быть объяснены с помощью структурно-функциональной модели работы мозга как субстрата психической деятельности. Согласно модели, предложенной А. Р. Лурией, выделены три функциональных блока головного мозга:

Регуляция общей и избирательной неспецифической активации мозга, включая ретикулярные структуры ствола, среднего мозга и диэнцефальных

отделов, лимбическую систему и медиабазальные отделы коры лобных и височных долей мозга, является частью любой психической деятельности, особенно в процессах внимания, памяти, регуляции эмоциональных состояний и сознания в целом.

Основные анализаторные системы (зрительная, кожно-кинестетическая, слуховая), корковые зоны которых расположены в задних отделах больших полушарий, обеспечивают прием, переработку и хранение экстероцептивной информации.

Конвекситальная лобная кора и ее корковые и подкорковые связи, ответственные за программирование, регуляцию и контроль за протеканием психической деятельности, включают моторные, премоторные и префронтальные отделы коры лобных долей мозга с их двусторонними связями. Лобные доли характеризуются большой сложностью строения и множествами двусторонних связей с корковыми и подкорковыми структурами [Хомская, 2006]. Анатомическое строение конвекситальной лобной коры обуславливает ее ведущую роль в программировании замыслов и целей психической деятельности, в ее регуляции и осуществлении контроля за результатами отдельных действий, а также всего поведения в целом.

Общая структурно-функциональная модель организации мозга, предложенная А. Р. Лурией, предполагает, что различные этапы произвольной, опосредованной речью, осознанной психической деятельности осуществляются с обязательным участием всех трех блоков мозга.

Прежде чем перейти к рассмотрению структур головного мозга и их функций, стоит вспомнить слова П. К. Анохина. «Каждая сложная структура имеет не одну, а несколько функций, связанных друг с другом в единую сеть. В этом смысле функциональная система является универсальным принципом организации процессов и механизмов, заканчивающихся получением конечного приспособительного эффекта» [Анохин, 1998, с. 17]. Если структура в общем виде отражает форму устойчивости объекта, то функция отражает его движение, развитие. Функция показывает сложность, систематизированность взаимодействия части и целого в структуре: целостная структура образуется за счет функционального взаимодействия ее частей. Поэтому потеря связи с целым приводит к потере функции, в то же время сама функциональная система может работать только при наличии взаимосвязей между ее частями. Каждая новая функция, соответствующая структуре нового уровня, всегда остается частью более общей функции, существовавшей и до этого. В прогрессивном развитии каждая вновь возникающая функция служит более общей, более существенной функции; та, в свою очередь, соответствует еще более значимой и т. д., до первичной функции.

### 2.1.1. Нейрональная организация психических функций

Структурно-функциональная модель А. Р. Лурии отражает концепцию существования корковых структурах больших полушарий как единственного мозгового образования, ответственного за психическую деятельность. Подкорковым структурам отводилась вспомогательная роль — прежде всего активизирующая функция. По мере накопления знаний изменились представления об участии подкорковых образований в реализации различных психических процессов. В настоящее время головной мозг трактуется как многоуровневая, иерархически организованная система, где ведущая роль отведена коре больших полушарий, в психической деятельности многое определяют не только корковые, но и подкорковые структуры. Эти представления подкрепляются материалами стереотаксических операций на глубоких структурах мозга и результатами электрической стимуляции различных подкорковых образований [Бехтерева, 1971; Смирнов, 1976 и др.], клиническими наблюдениями за больными с поражениями различных подкорковых структур [Лурия, 1974; Московичюте, Кадин, 1975; Московичюте, Симерницкая, Смирнов и др., 1982; Гогошидзе, 1984, Хомская, Гогошидзе, 1983; Корсакова, Московичюте, 1985; Болдырева, Манелис, Скорятина и др., 1998; и др.]. Таким образом, все высшие психические функции имеют и горизонтальную (корковую), и вертикальную (подкорковую) мозговую организацию. Любое нарушение вертикальных связей влечет за собой нарушение горизонтальных связей.

Традиционно в головном мозге принято выделять ствол, мозжечок и большой мозг (рис. 2.1). Как анатомическое образование большой мозг состоит из двух полушарий, в каждом из них филогенетически и функционально объединяются обонятельный мозг, базальные ядра и кора большого мозга, конвекситальная, базальная, медиальная. В каждом полушарии имеется пять долей: лобная, теменная, затылочная, височная и островковая — островок.

*Первый уровень* функциональной организации представляет кора головного мозга, она осуществляет высшее управление чувствительными и двигательными функциями, преимущественное управление сложными когнитивными процессами. *Второй уровень* составляют базальные ядра полушарий большого мозга, они управляют произвольными движениями и регуляцией мышечного тонуса. На *третьем уровне* (гиппокамп, гипофиз, гипоталамус, поясная извилина, миндалевидное ядро) осуществляется преимущественное управление эмоциональными реакциями и состояниями, а также эндокринная регуляция. *Четвертый уровень* (ретикулярная формация и другие структуры ствола мозга) определяет управление вегетативными процессами [Синельников, Синельников, 1996]. Ретикулярная формация представляет собой сосредоточение полимодальных нейронов, образующих неспецифическую систему ствола. Другими неспецифическими системами ствола головного мозга являются

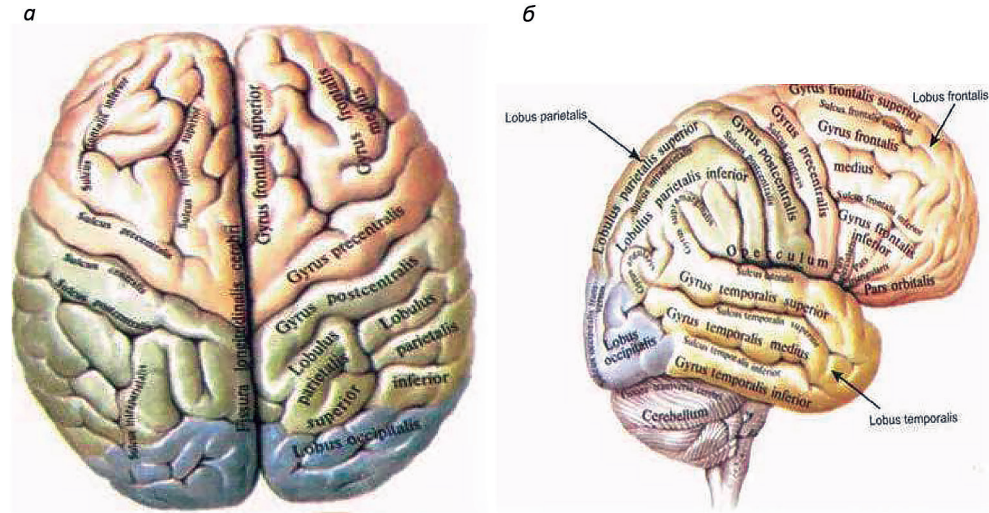


Рис. 2.1. Большой мозг:

а — вид сверху; б — вид справа [Синельников, Синельников, 1996]



Рис. 2.2. Иерархия неспецифических систем мозга

задний, средний и продолговатый мозг (рис. 2.2). Ретикулярная формация на границе среднего и заднего мозга образует оральные отделы ствола мезоуровня. В нижней части ретикулярной формации неспецифическая система продолговатого мозга образует каузальный уровень. К ретикулярной формации подходят многочисленные коллатерали от всех афферентных путей сенсорных

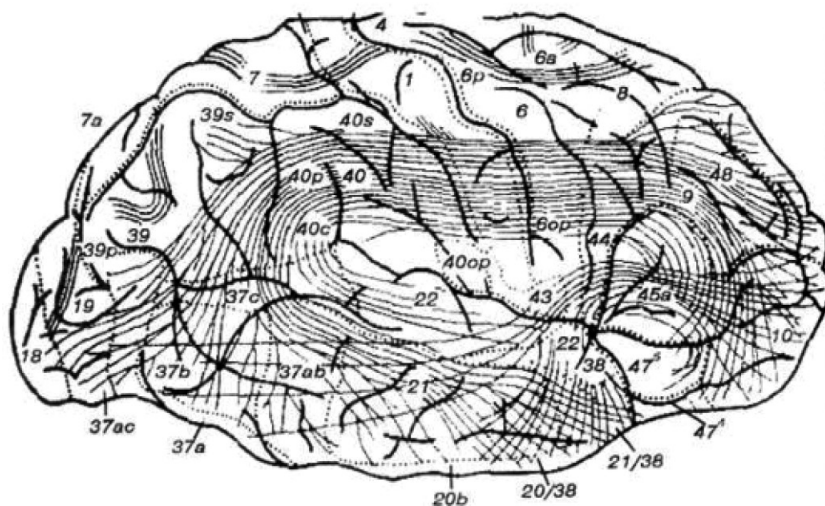


Рис. 2.3. Ассоциативные (корково-корковые) связи [Дзугаева, 1975]  
Цифрами указаны поля Бродмана

систем. Неспецифические восходящие системы (пути от ретикулярной формации к коре) обеспечивают возбуждение коры, активацию ее деятельности. Структуры переднего мозга (большой мозг и промежуточный мозг) организуют экстрапирамидальную систему вертикальных связей, идущих вниз.

Благодаря иерархической соподчиненности различных систем мозга уменьшается число степеней свободы каждой нижележащей системы, один уровень иерархии управляет другими (нижележащими) уровнями. На основе прямых и обратных связей осуществляется контроль за этим управлением. В то же время подобная иерархия допускает определенную избыточность в структурной организации мозга за счет вовлечения большого числа нервных элементов в ту или иную его функцию, что приводит к повышению надежности работы мозга и служит основой для компенсации функций при его поражениях. Как и другие принципы организации мозга, иерархия обеспечивает горизонтальное взаимодействие за счет кортико-кортикальных связей (рис. 2.3), его интегративную целостную деятельность. Динамичность и индивидуальная изменчивость мозговых структур обеспечены аналогичными свойствами составляющих их макро- и особенно микросистем.

При анализе топографии структур коры еще в 1894 году А. Р. Кэмпбелл в своих работах «Новые представления о гистологической анатомии и нервных центрах» и «Сетчатка глаза позвоночных» выделил первичные, вторичные и третичные корковые поля.

*Первичные поля* производят специфический анализ импульсов определенной модальности (зрительной, слуховой и т. д.), например максимально

тонкий анализ физических параметров стимула. *Вторичные поля*, как ядерные зоны, осуществляют взаимодействие различных анализаторных зон. Они характеризуются бóльшим развитием клеток, переключающих афферентные импульсы IV слоя на пирамидные клетки III слоя, откуда берут свое начало ассоциативные связи коры. Переключения такого типа осуществляет вторичный проекционно-ассоциативный нейронный комплекс. Первичные и вторичные поля получают импульсы непосредственно от таламуса, в то время как третичные — только от первичных и вторичных полей. Связи вторичных полей коры с подкорковыми структурами более сложны, чем связи первичных полей. К вторичным полям афферентные импульсы поступают из ассоциативных ядер таламуса (после их переключения), для сравнения: к первичным — непосредственно из ядер таламуса. *Третичные поля* играют определяющую роль в сложных видах психической деятельности — символической, речевой, интеллектуальной. С их участием осуществляются сложные надмодальностные виды психической деятельности — символической, речевой, интеллектуальной.

Каждая первичная сенсорная область коры характеризуется топографической организацией проекций. Нейроны первичной сенсорной коры и таламические ядра формируют сеть, которая позволяет распределить потоки информации относительно реакций «что?» и «где?». На первый вопрос отвечает вентральный путь, на второй — дорсальный путь обработки информации. Их общая задача — детекция объекта и его основных характеристик. Структурно-функциональная организация вентральной системы специфична для каждого анализатора. Дорсальная система кодирует скорость и позицию объекта, управляет моторными программами (функция «как?»).

В организации информационного потока от рецепторов к сенсорным областям и его модулирования в ассоциативных, моторных и корковых областях особая роль принадлежит таламусу (парные ядра, расположенные около центра мозга). Иногда таламус называют «воротами к коре», поскольку практически любая информация попадает в кору через таламус. В соответствии с двумя системами функционируют две главные компоненты таламуса — дорсальный таламус (15 ядер) и вентральный таламус, главной частью которого является ретикулярное ядро. Ретикулярные нейроны вентрального таламуса получают прямые возбуждающие проекции от дорсальной компоненты таламуса и, в свою очередь, возбуждают проекции обратной связи от коры и тормозные проекции восходящих активизирующих систем ствола мозга.

«Вентральный и дорсальный пути обработки информации не являются строго параллельными, поскольку взаимодействуют на разных иерархических уровнях. В обеих системах существуют обратные связи, возвращающие информацию от более высших уровней к низшим (нисходящие потоки информации)» [Кропотов, 2010, с. 203]. Благодаря этим обратным связям реализу-

ются операции, обеспечивающие внимание и рабочую память. Связи между вентральной и дорсальной проводящими системами позволяют координировать обработку информации и формировать единый перцептивный образ на основе различных сенсорных характеристик. После обработки сенсорная информация перенаправляется в области префронтальной коры через последовательные (заднефронтальные) пути и движется к гиппокампу.

### 2.1.2. Поля Бродмана

На протяжении последних ста лет ученые, занимающиеся нейрофизиологией мозга, стремились соотнести определенные участки мозга с определенными психическими функциями. В настоящее время принято говорить о топографии мозга и нейровизуализационном картировании, позволяющем наглядно «привязать» психические функции к конкретным областям коры головного мозга, то есть локализовать психические функции.

Первую системную попытку представить нейрональную организацию коры головного мозга предпринял К. Бродман, который в 1909 году описал 52 анатомически различные области коры — **поля Бродмана** (рис. 2.4). Нумерация областей отражает порядок, в котором Бродман брал образцы мозга. Описание локализации функций в коре головного мозга на основе полей Бродмана прочно вошло в научную практику и часто используется в литературе и сегодня.

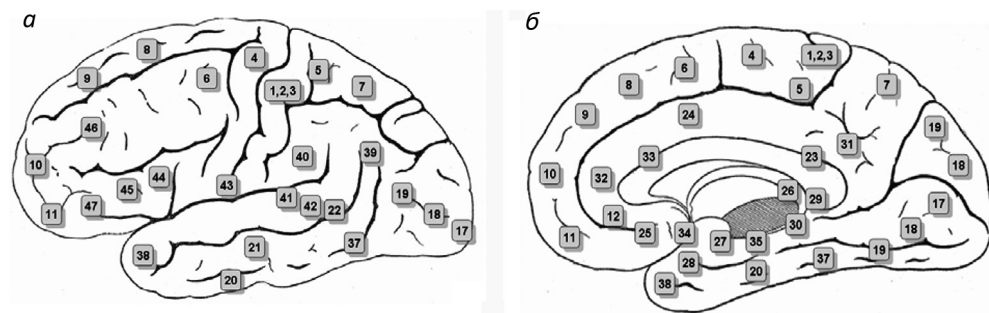


Рис. 2.4. Цитоархитектонические поля Бродмана:  
а — вид снаружи; б — вид изнутри

Со временем было получено много новых данных о цитоархитектонике и функциональных зонах мозга с помощью более совершенных методов, чем окраска по Нисслю. Например, картирование поверхности мозга с учетом волоконного строения позволило О. Фогту и Ц. Фогту описать 150 миелоархитектонических полей, а И. Н. Филиппову и С. А. Саркисову — 47 полей.

**Двигательная функция.** Структуры мозга, отвечающие за двигательную функцию, инициируют движения, обеспечивают их координацию, в том числе

согласование содружественных движений отдельных групп мышц. Сами движения выстроены в определенной иерархии:

- *Нижний уровень* составляют простые рефлекторные движения, за которые отвечают структуры спинного мозга и мозгового ствола.
- *Уровень синергии (согласования)* движений обеспечивается работой мозжечка и ядер больших полушарий головного мозга.
- *Уровень синтетического сенсорного поля* образуют области коры больших полушарий, лежащие вокруг центральной (роландовой) борозды, — поля Бродмана под номерами 4, 6, 8, 9. Перед центральной бороздой расположены моторные и премоторные поля коры, а сзади — сенсомоторные поля. Этот уровень обеспечивает приспособляемость движения к внешнему миру, когда движения приобретают целевой, или финальный, характер и превращаются в проекцию движения на его конечную точку во внешнем пространстве. Уровень праксиса (целенаправленных действий) регулируют структуры, которые занимают фронтальные (лобные) области коры больших полушарий. Именно в этой зоне строятся речевые и графические координации. Ее нарушения (атаксия) вызывают трудности с движениями.

Нейрофизиологическое обеспечение двигательной функциональной системы важно не только с клинической точки зрения. Многие проблемы в обучении связаны с зонами, обеспечивающими двигательный контроль. Незрелость или поражения структур третьего или четвертого уровней могут вызывать нарушения целенаправленного двигательного акта. Так, резекция или удаление дополнительной моторной коры, расположенной на медиальной поверхности полушария, вызывает временную потерю речи (афазию), которая обычно проходит через несколько недель.

Поражение премоторных зон сопровождается отчетливым нарушением двигательных навыков, что сказывается на почерке, быстроте и плавности письма/печатания или приводит к снижению способности автоматизированно выполнять серию операций для типичного двигательного акта, формируя синдром инертности двигательных стереотипов. В учебном процессе данное поражение оборачивается неустойчивостью и ригидностью при формировании навыка письма или чтения. Регистрация активности отдельных нейронов показала, что нейроны премоторной коры низших обезьян активируются до выполнения движения. Возможно, они связаны с программированием движения. Одновременно в структуре нейронной реакции находит отражение направление, в котором будет производиться данное движение (в ответ, например, на условный сигнал). Изучение корреляции нейронных характеристик с параметрами движений рук у обезьяны позволило предположить, что в премоторных нейронных сетях содержится своеобразная «библиотека»



отдельных целенаправленных движений. Если поражены только нижние отделы премоторной зоны левого (доминантного по речи у правой) полушария, происходит нарушение речи, причем как устной, так и письменной. Нарушение кинетической организации артикуляции является основой той формы моторной афазии, которую описал П. Брока (1861).

В схему целенаправленного двигательного акта включена теменная кора (поле 5 Бродмана). Нейронные сети поля 5 кодируют пространственную траекторию движения, и при воздействии нагрузок на движущуюся руку эти нейроны лишь незначительно модулируют свою активность. Следовательно, нейронные сети моторной коры кодируют движение в координатах его динамики, тогда как нейроны теменной коры кодируют пространственную траекторию движения. Таким образом, продуктивность зрительно-моторной координации существенно зависит от функциональной активности теменной коры.

Клинические наблюдения указывают на важную роль дофаминергической системы переднего мозга в двигательном контроле. Снижение активности дофаминергической системы приводит к торможению двигательной активности, а активация этой системы — к ее возрастанию, чрезмерная активация — к гиперактивности.

**Зрительная функция.** Анализ зрительной информации выполняется в затылочной области коры головного мозга (поля Бродмана 17–19). От поля 17 начинаются пути, где происходит обработка зрительных сигналов. Один путь, идущий в дорсальном направлении к полям теменной ассоциативной коры, участвует в формировании пространственного зрения, другой путь, в вентральном направлении (нижневисочная кора), участвует в формировании предметного зрения. Далее зрительная информация поступает к нейронам, находящимся на стыке височной и теменной областей (они не имеют соответствия полям Бродмана). Регистрация реакций отдельных нейронов показала, что нейронные сети нижневисочного поля, по-видимому, участвуют в зрительной дифференциации различных объектов во внешней среде, в том числе удержание константности цвета и формы. На всем пути от полей 17–19 к нижневисочному полю наблюдается устойчивая тенденция к увеличению площади рецептивных полей отдельных нейронов. При разрушении нижневисочных областей коры страдают механизмы высшего уровня анализа, но свойства восприятия сохраняются. Предположительно нарушается выделение объектов какой-то одной категории. Например, больной хуже различает лица или не различает их вовсе [Шульговский, 2000, с. 111].

**Слуховая функция** представляет собой высший центр слуховой системы и располагается в височной доле (поля Бродмана 41, 42 и частично 43). В каждой из картированных зон имеет место томотопия — полностью представлен нейроэпителий кортиева органа (рецепторной части слухового анализатора, расположенной внутри перепончатого лабиринта). Нейроны слуховой системы

способны избирательно реагировать на определенную высоту звука. Для большинства нейронов разных уровней слуховой системы характерно увеличение реакций, интенсивность стимула увеличивается в широком диапазоне (от 0 до 120 дБ). Интенсивность звука кодируется не только частотой импульсации, но и количеством возбужденных нейронов. Поэтому считают, что плотность потока импульсации является нейрофизиологическим коррелятом громкости. Кроме того, в центральных отделах слуховой системы обнаружены нейроны, обладающие определенной избирательностью к интенсивности звука, то есть реагирующие на звук в довольно узком диапазоне. Сегодня в слуховую систему включают также поле Бродмана 22, его разрушение вызывает слуховые галлюцинации, нарушение слуховых ориентировочных реакций, музыкальную глухоту.

**Соматосенсорная (чувствительная) функциональная система** представлена первичной и вторичной областями (поля Бродмана 1–5, 7). Первичная область (поля 1, 2, 3а, 3б) включает переднюю часть теменной доли, захватывая дно и заднюю стенку центральной борозды. Нейроны поля 1 реагируют как на кожную стимуляцию, так и на стимуляцию глубоких структур. Нейроны поля 2 получают информацию от глубоких структур (возбуждаются при сдавливании кожи и практически не реагируют на легкое прикосновение). Нейроны поля 3а получают информацию от мышечных и суставных рецепторов. Нейроны поля 3б реагируют на легкое прикосновение к коже, сгибание отдельных волосков. Вторичная область лежит на передней стенке сильвиевой извилины, захватывает нейроны моторной прецентральной коры (поля 4, 6) и ростральную теменную кору (поле 5). Обе области тесно взаимосвязаны между собой. Так, поле 5 является пространственно организованным входом со стороны полей 1 и 2. Нарушения сенсомоторных зон коры приводит к потере чувствительности и деформации ощущений. Органические поражения в поле 1 вызывают дефицитарность при различении рельефа поверхности, которую ощупывают, в поле 2 — в различении формы предметов (например, невозможно отличить квадрат от ромба), в поле 3 — при различении текстуры поверхности (трудно отличить мягкую и твердую поверхности, шероховатую и гладкую). В целом повреждение первичной соматосенсорной области коры приводит к дефициту пространственного различения (например, трудно определить величину углов, характер вогнутости или выпуклости поверхности), к дискриминации временной последовательности ощущений (частота интервалов последовательности физических ощущений, колебаний изменений воздействующих стимулов разной физической природы). Повреждения постцентральной коры ухудшает способность оценивать положение конечности при ее пассивном или активном перемещении. При нарушениях во вторичных отделах возникают явления афферентной апраксии — неспособности выполнять тонкие дифференцированные движения (дефицит афферентной основы движения). Если эти нарушения локализуются в левом полушарии

с распространением на нижние отделы (область проекции лица, губ, языка), то могут возникать дисфункции, связанные с невозможностью найти, в каком положении должны быть губы и язык, чтобы произнести соответствующие звуки. Происходит смешение близких артикулем (например, замена «Б» или «П» на «М»), страдает письмо (например, вместо «халат» пишется «ханат»).

**Обонятельная функция** представлена первичными обонятельными центрами, образованными телами третичных нейронов (основной клеточный элемент — звездчатые нейроны). От обонятельных рецепторных клеток информация передается практически ко всем структурам лимбической системы и только частично — к структурам новой коры, в связи с чем их проекция прослеживается примерно в зоне поля Бродмана 28. Одновременно обонятельная система проецируется в области переднего конца гиппокампальной извилины (поле 34). Кора этой области имеет трехслойное строение. При раздражении отмечаются обонятельные галлюцинации, повреждение коры ведет к anosмии (потере обоняния). Прямая связь обонятельного анализатора с лимбической системой (в первую очередь с ядрами таламуса и гипоталамуса) объясняет присутствие значительного эмоционального компонента в обонятельном восприятии. Важно заметить, что обонятельная сенсорная система принципиально отличается от всех остальных сенсорных систем тем, что ее афферентные волокна не переходят на противоположную сторону большого мозга, не переключаются в таламусе и, вероятнее всего, не имеют проекции в структурах новой коры. Особенности структурно-функциональной организации обусловлены тем, что обонятельная рецепция является одним из самых древнейших видов чувствительности [Жуков, 2007].

Как показали электроэнцефалографические исследования, основная информация о **вкусе** передается в нейрональный участок передней части ядра одиночного пути продолговатого мозга. Реактивность нейронов этого участка обусловлена повышением частоты импульсного разряда на несколько вкусовых модальностей, то есть они являются мультимодальными. Кроме того, часть нейронов реагирует на температурные и тактильные раздражители. От нейронов ядра одиночного пути одна часть волокон II порядка в составе медиального пучка направляется к дугообразному ядру таламуса, а другая — к нейронам дорсальной части моста (парабрахиальное ядро). Часть таламических нейронов вкусового анализатора также обнаруживает полимодальность. Аксоны таламических нейронов образуют корковую проекцию вкусового анализатора. При этом точная локализация центра вкуса в коре не определена. Предполагается, что вкусовая система проецируется в гиппокампальной извилине — латеральной части постцентральной извилины (поле 43), по соседству с обонятельной областью коры.

**Некоторые высшие психические функции.** Среди высших психических функций лучше всего изучена топография речевой и регуляторной функций.

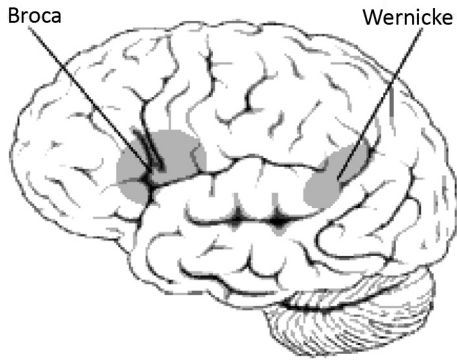


Рис. 2.5. Локализация центров Брока (Broca) и Вернике (Wernicke)

В то же время системы, обеспечивающие познавательную деятельность на уровне зрительных синтезов и эмоционального мониторинга, не менее значимы для продуктивности обучения. Рассмотрим их более подробно.

**Речевая деятельность** обеспечивается целостностью зрительных и слуховых областей, моторного представительства речевых мышц, центров Брока и Вернике (рис. 2.5) и угловой извилины. Наряду с перечисленными выше корковыми центрами, на других уровнях мозговая система обеспечения

речи включает ряд подкорковых структур, прежде всего ассоциативные ядра таламуса и систему межполушарных связей.

Зона Вернике занимает небольшой отдел верхней височной извилины (*platum temporale*) и смежные с ней участки (поля 37, 40, 42). Ее поражение приводит к речевой агнозии (неспособности понимать речь). Центр Брока (речедвигательный анализатор) отвечает за анализ и синтез раздражений, приходящих от мускулатуры. Его поражение приводит к невозможности объединить отдельные речевые движения в единый речевой акт — утрате функции устной речи (моторной афазии), но элементарная двигательная способность речевых мышц сохраняется. Исследования под руководством Н. Канвишер [Fedorenko, Nieto-Castañón, Kanwisher, 2012] позволили выделить в центре Брока две функционально и пространственно разделенные зоны. Первая входит в состав нейронных сетей воспроизводства речи (активизируется только при чтении осмысленного текста), вторая — в состав сетей, связанных с решением задач и запоминанием.

Угловая извилина нижней теменной доли (поля 18, 19) отвечает за узнавание и чтение букв. Разрушение этой зоны ведет к утрате способности распознавать зрительные образы, в том числе буквы, складывать из них слова и фразы (алексии), но со стороны зрения расстройств нет.

**Организация наглядных пространственных синтезов** обеспечивается системой нейрональных связей зон, находящихся на стыке затылочных, височных и постцентральных областей коры. Она образована третичными полями коры задних отделов больших полушарий, которые находятся вне ядерных зон анализаторов. К зонам пространственных синтезов относятся верхнетеменная область (поля 7 и 40), нижнетеменная область (поле 39), средневисочная область (поля 21, 37) и зона перекрытия височной, теменной и затылочной коры (поле 37 и частично поле 39). В известной степени цитоархитектоника этих зон

определяется строением соседних ядерных зон анализаторов. Для третичных полей коры характерен третичный ассоциативный комплекс, то есть передача импульсов от клеток II слоя к клеткам III слоя (средним и верхним подслоям). Третичные поля не имеют непосредственной связи с периферией и соединены горизонтальными связями лишь с другими корковыми зонами. По мнению нейрофизиологов, третичные поля созревают лишь к 7 годам, что позволяет идентифицировать данную функциональную систему как аппарат межанализаторных синтезов. При поражении нижнетеменных и теменно-затылочных отделов утрачивается способность к смысловой и структурной переработке информации: нарушается понимание общего смысла происходящего, совмещение впечатлений в единую структуру, теряется способность ориентироваться в пространстве (особенно право и лево). Возникают трудности с тем, чтобы назвать предметы, анализировать не только наглядные, но и символические отношения (например, трудно показать указательный или безымянный палец), сложные грамматические конструкции, происходит распад способности к счету (сложение, вычитание, умножение, деление). Человек может потерять способность воспринимать предметы как знакомые, ориентироваться в окружающем мире, у него нарушается восприятие лиц, причем не только знакомых, но и собственного отражения в зеркале.

**Функциональная система мотивации и эмоций** обеспечивается лимбической системой головного мозга. Ее структура объединяет гиппокамп (старая кора), обонятельные луковицы, обонятельный бугорок (древняя кора), области новой коры (лимбическую кору на медиальной поверхности полушария и орбито-фронтальную кору на базальной части лобной доли мозга) и структуры конечного, промежуточного и среднего мозга (миндалину, перегородку, гипоталамус, переднюю группу ядер таламуса, центральное серое вещество среднего мозга).

Одной из главных структур лимбической системы является гипоталамус. При его посредничестве большинство лимбических структур объединено в целостную систему, регулирующую мотивационно-эмоциональные реакции человека и животных на внешние стимулы и формирующую адаптивное поведение, построенное на основе доминирующей мотивации (рис. 2.6).

Повреждение структур гиппокампа, мамиллярного тела и некоторых других участков, которые входят в состав лимбической системы головного мозга (рис. 2.7), вызывает глубокие расстройства эмоций и памяти. В 1937 году американский нейроанатом Дж. Пейпец описал цепочку взаимосвязанных нервных структур в составе лимбической системы, обеспечивающих возникновение и протекание эмоций. Повреждение одной из этих структур приводит к глубоким изменениям в эмоциональной сфере человека.

В ходе экспериментов на животных Дж. Олдс (1953) выявил, что положительные зоны, которые животное охотно стимулировало, находятся главным

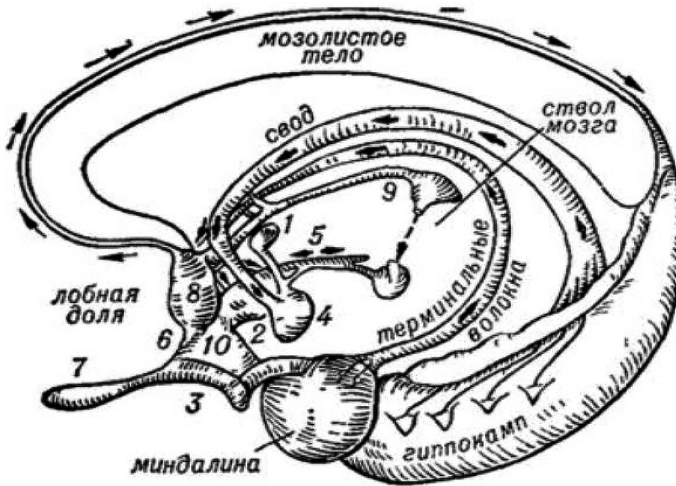


Рис. 2.6. Связи лимбической системы:  
 1 — переднее таламическое ядро; 2 — диагональная связка (Брока); 3 — латеральная обонятельная полоска; 4 — мамиллярное тело; 5 — медиальный пучок переднего мозга; 6 — медиальная обонятельная полоска; 7 — обонятельная луковица; 8 — перегородка; 9 — медуллярные волокна; 10 — обонятельный бугорок [Шульговский, 2000]

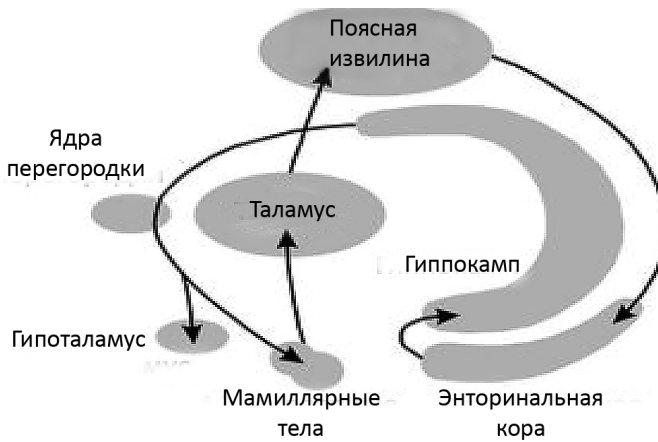


Рис. 2.7. Эмоциональный круг Пейпеца

образом в медиальной области головного мозга, простирающейся от ядер миндалины через гипоталамус к покрышке среднего мозга. Отрицательные зоны, связанные с избеганием стимуляции, преимущественно сосредоточены в дорсальной части среднего мозга и латеральной части заднего гипоталамуса. В мозге крысы пункты положительной самостимуляции составляют примерно 35 %, отрицательные — 5 % и нейтральные — 60 % [Шульговский, 2000, с. 57].

В современных исследованиях было показано, что функция лимбической системы головного мозга не ограничивается эмоциональными реакциями. Она также принимает участие в поддержании постоянства внутренней среды (гомеостаза), регуляции цикла «сон — бодрствование», вегетативных и эндокринных функций, в процессах обучения и памяти.

**Регуляция психической деятельности (исполнительная система мозга)** обеспечивается лобными долями мозга (префронтальной корой) — филогенетически наиболее поздно сформировавшимися отделами.

На префронтальной коре различаются:

- дорсолатеральная префронтальная зона (сохранение устойчивости внимания, селекция значимых мыслей и ощущений, рабочая память, планирование);
- медиальная префронтальная зона (представления о других людях, модели личности, опираясь на которые мы понимаем и прогнозируем поведение других людей и предстоящие события; связь с аутизмом и другими расстройствами, когда есть проблемы с социальным взаимодействием);
- инфериорно-орбитальная зона (эмоциональный интеллект, регуляция своих действий, ориентация на возможные реакции других, определение субъективной ценности и приятности тех или иных удовольствий (прикосновений, вкуса пищи, созерцания красоты и т. п.) и ощущений) (рис. 2.8).

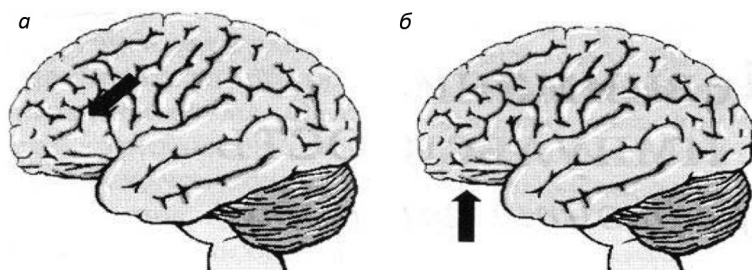


Рис. 2.8. Префронтальная кора (показана стрелками, вид снаружи):

а — дорсально-латеральная; б — инфериорно-орбитальная

Регуляторная система мозга активируется практически мгновенно, как только началась обработка информации. Широко распределенная система обработки зрительной информации, включающая сенсорную, теменную и лобную зоны коры, активизируется в течение 30 мс. Через 56 мс после предъявления стимула активизируется затылочная кора, через 80 мс дорсолатеральная префронтальная кора вовлекается в обработку зрительной информации. Таким образом, можно говорить о постоянном регуляторном сопровождении любых когнитивных процессов, причем на совершенно ранних стадиях, то есть еще до того, как процесс обработки информации перейдет в статус осознанного (до 200–250 мс).

Медиально-базальные отделы регулируют состояние активности, создавая необходимый тонус коры и модифицируя состояние бодрствования в соответствии с задачами, которые стоят перед человеком. Поражение лобных долей приводит к нарушению высших форм организации сознательной деятельности, сложных форм поведения, но на элементарном уровне проявления последних сохраняются (например, ориентировочный рефлекс). Распадаются сложные программы деятельности, нарушаются замыслы и намерения. Вместо последних возникают простые формы поведения, инертные стереотипы. Сохраняется копирование. Снижается способность выполнить инструкцию. Человек теряет контроль над собственными действиями, у него распадается функция акцептора действия (по П.К. Анохину). Однако он способен зафиксировать аналогичные ошибки, допущенные другим лицом. Также страдает сложная мнестическая и интеллектуальная деятельность: больной неспособен сопоставить детали картинки друг с другом, выдвинуть гипотезу, создать прочные мотивы запоминания, поддерживать активное напряжение и произвольное внимание. Наблюдается стертость эмоций и неадекватное поведение, снижается способность выражать мысли и чувства.

В переживании и выражении эмоций участвует именно префронтальная кора (вентро-медиальная зона, объединяющая средне-нижние участки префронтальной коры). Посылая успокаивающие сигналы в лимбическую и сенсорную системы мозга, когда нужно сосредоточиться, префронтальная кора обеспечивает устойчивое внимание. При вовлечении префронтальной коры в регуляцию эмоций это происходит существенно иначе, чем в более простой лимбической системе, которая управляет настроением и половым влечением. Структуры префронтальной коры позволяют переводить процессы в лимбической системе в узнаваемые чувства, эмоции и слова (например, ненависть или любовь, страсть или глуть).

Структурно-функциональная организация нейронального субстрата мозга, обеспечивающего психическое функционирование, отражает эволюционное развитие, связанное с усложнением поведения человека.



## 2.2. Нейронное обеспечение психической активности

Макроуровень функциональной активности мозга традиционно описывается через его топографическую организацию, микроуровень — через строение и функцию нейронов — «кирпичиков» психической активности человека.

Человеческий мозг составляют более чем 100 млрд нейронов, на уровне химического и электрического взаимодействия они образуют неисчислимо количество взаимосвязей — нейрональных ансамблей. (Участок коры головного мозга длиной 1,5 мм и шириной 0,5 мм содержит 10 000 нейронов и около 10 000 000 соединений между ними.) Только одна колонка нейронов, соединяющая поверхностную часть мозга с его центром (неокортикальная колонка), имеет нейроны порядка 240 различных типов, каждый из которых может быть соединен с тысячами других. Многообразие химических и электрических сигналов, связывающих нейроны друг с другом, отражает системную активность мозга, который непрерывно перерабатывает информацию, отвечает на воздействие, упорядочивает поступающие и повторяющиеся сигналы.

Диффузная спектроскопия, выполненная на магнитно-резонансном томографе (рис. 2.9), демонстрирует структуру нейронной сети живого человека. Волокна в ней гораздо более упорядочены, чем было принято считать раньше: они представляют собой трехмерную сеть с несколькими параллельными магистралями. Похожим образом выглядит и структура мозга четырех видов обезьян, снимки их головного мозга тоже были сделаны. Полученные результаты нейромиджинга позволяют сделать вывод, что построение нейронной сети такого типа эволюционно имеет место в силу того, что является наиболее выгодным:

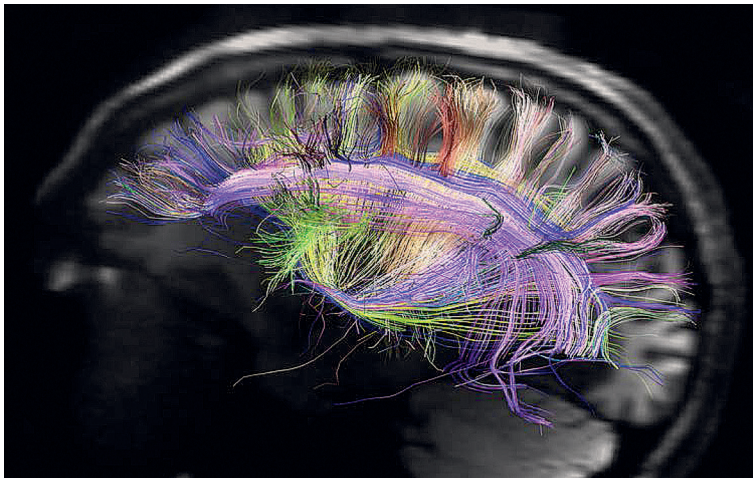


Рис. 2.9. Трехмерное изображение нейронной сети мозга [Wedeen, Rosene, Wang et al., 2012]

новым окончаниям удобнее расти вдоль уже имеющих структур, а значит, в процессе развития организма мозг успевает стать более вместительным.

**Нервные клетки (нейроны)** — это клетки размерами от 3 до 130 микрон с отростками (рис. 2.10). Длина отростков — от нескольких микрон до 1,5 м. Различают два вида отростков:

- аксон (нейрит) проводит импульсы от тела нервной клетки к другим клеткам или тканям органов; нейрон всегда имеет только один аксон (это самый длинный отросток);
- дендриты — ветвящиеся отростки, их количество варьирует.

Дендриты проводят импульсы к телу нервной клетки (по некоторым данным, со скоростью 8–10 м/с) [Годфруа, 1996]. В цитоплазме нервной клетки находится нейрофибриллярный аппарат — тонкие нити, образующие сеть и проводящие возбуждение. Одна нервная клетка, способная взаимодействовать с другими нейронами, может устанавливать до 20 000 связей.

Отростки нервных клеток, покрытые оболочкой, образуют нервные волокна. Нервы состоят из пучков нервных волокон, покрытых общей соединительнотканной оболочкой.

Соединения между нейронами обеспечивают многочисленные синапсы и электротонические контакты. Терминальная бляшка пресинаптического

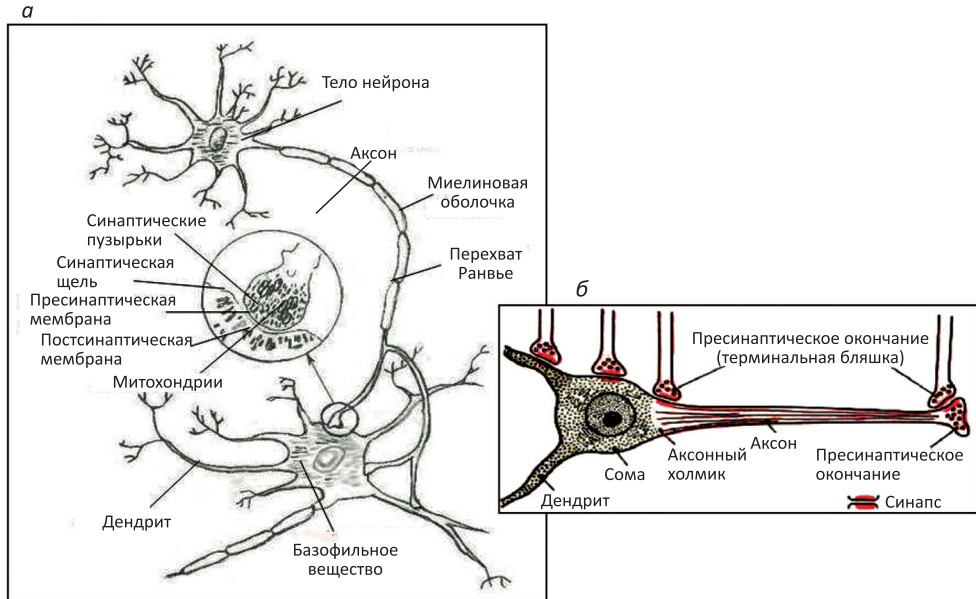


Рис. 2.10. Строение нейрона (в середине — область синапса) (а) [Годфруа, 1996, т. 2, с. 266] и схематизированное изображение терминальной бляшки (б)

нейрона содержит пузырьки с запасом нейромедиатора и митохондрии, доставляющие энергию, необходимую для передачи нервного сигнала. Подробнее о нейрофизиологии нервной ткани и цитоархитектоникой коры головного мозга см.: [Краснощекова, 2008].

Все нейроны можно разделить на две большие группы:

- *мономодальные* (чистые, специфические, проводят только одну модальность) нейроны, которые составляют примерно 10 %;
- *полимодальные* (проводят от двух до пяти модальностей), составляющие 90 %.

Нейроны разных отделов мозга разнообразны по форме. Выделяют до 56 разновидностей нервных клеток коры. Нейроны, расположенные на выходе нейронной сети какой-то структуры, имеют длинный аксон, по которому возбуждение покидает данную зону мозга. Например, нейроны двигательной коры головного мозга человека (пирамиды Беца) имеют аксон длиной около 1 м. Он соединяет двигательную кору больших полушарий с сегментами спинного мозга. По этому аксону передаются двигательные команды, например пошевелить пальцами ноги.

Пирамидные нейроны (гигантские Беца, крупные моторные, средние, мелкие) — наиболее многочисленная популяция нейронов, составляют от 51 до 86 %. Оставшую часть формируют звездчатые (от 8 до 47 %) и веретенообразные нейроны (от 2 до 6 %) [Краснощекова, 2008].

По функциональному предназначению в коре выделяют:

- преимущественно возбуждающие нейроны: пирамидные, звездчатые, клетки Мартинотти (перевернутые пирамиды), глиоподобные;
- преимущественно тормозные: большие и малые корзинчатые, вертикально ориентированные, веретенообразные.

В пределах своей локализации в коре возбуждающие нейроны формируют цепь реверберации — постепенное уменьшение интенсивности электрического сигнала по мере его многократного повторения, тем самым локальная активация поддерживается дольше, чем длительность действия стимула. Тормозные нейроны выполняют три ключевые функции:

- поддерживают текущее торможение, не позволяя «перевозбуждаться» активированным корковым цепям;
- формируют сложные воспринимающие поля нейронов в коре на основе пространственного паттерна распределения тормозных клеток;
- создают различные операции сравнения в пределах коры на основе комбинаций возбуждения и торможения.

Основным свойством нейронов является способность возбуждаться (генерировать электрический импульс) и передавать (проводить) это возбужде-

ние к иным нейронам, мышечным, железистым и другим клеткам. Традиционно основной функцией нейронов считается проведение нервного импульса. Однако современные исследования выявили функциональную специфику как отдельных нейронов, так и их составляющих. В некоторых экспериментах [Smith, Smith, Branco et al., 2013] было продемонстрировано, что в дендритах идет свой процесс обработки информации. Измерение электрической активности отдельных дендритов в клетках второго и третьего слоев зрительной коры у мышей показали, что активность этих клеток меняется, когда животное смотрит на чередующиеся вертикальные полосы (происходит обработка сравнительно простой зрительной информации). Как подтверждают новые наблюдения, дендриты, которые обычно рассматривают как пассивные проводники электрохимических импульсов, способны сами создавать подобные сигналы, не повторяющие те, которые возникают в основном теле нервной клетки. В связи с полученными данными была выдвинута гипотеза относительно предназначения собственных сигналов в дендритах. Зарегистрированные импульсы формируются ионотропными рецепторами глутамата, селективно связывающий N-метил-D-аспартат — ионными каналами, которые отличаются большей инерцией. Каналы открываются и закрываются не так быстро, как меняется состояние ряда иных рецепторов. Поэтому активность дендритов зависит не просто от последовательности полученных импульсов, но и от формы огибающей<sup>1</sup> сигнала, активно используемой при цифровой обработке сигналов (рис. 2.11).

Также показано, что стимуляция мнемической активности при фокусировке внимания зависит от астроцитов [Chen, Sugihara, Sharma et al., 2012]. Астроцит (лат. *astrocytus*; от греч. *astron* — звезда; *kýtos* — здесь: клетка) — нейроглиальная клетка звездчатой формы с многочисленными отростками. Долгое время астроциты считались вспомогательными клетками (рис. 2.12).

Известно, что концентрация внимания усиливает процессы долговременной памяти, но какие клетки мозга участвуют в этом процессе — до сих пор не вполне понятно. В эксперименте мышам демонстрировали параллельные черно-белые полосы, ориентированные в разных направлениях. Чтобы сымитировать эффект «сфокусированности», ученые стимулировали у некоторых мышей нейроны базальных ядер, которые активируются во время концентрации внимания и вырабатывают нейромедиатор ацетилхолин. Спустя некоторое время мышам показывали те же полосы наряду с другими изображениями и записывали электрическую реакцию визуальной коры мозга. Чем сильнее была реакция, тем лучше, по мнению исследователей, животные запомнили продемонстрированное изображение. Роль астроцитов в опосредованном влия-

---

<sup>1</sup> Огибающей называют кривую, проходящую через максимумы отдельных пиков высокочастотного сигнала.

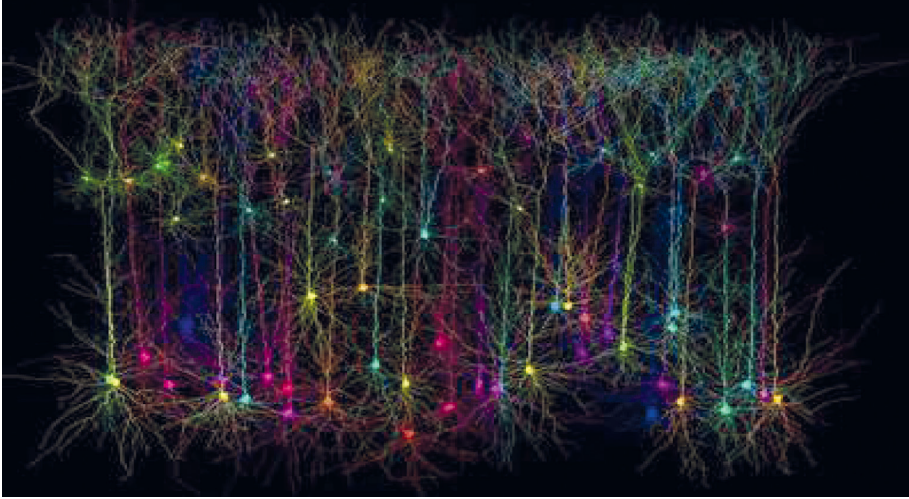


Рис. 2.11. Компьютерная модель нейронов, дендриты сверху [Отростки, 2013]

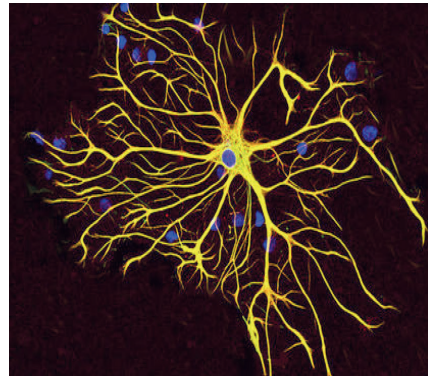
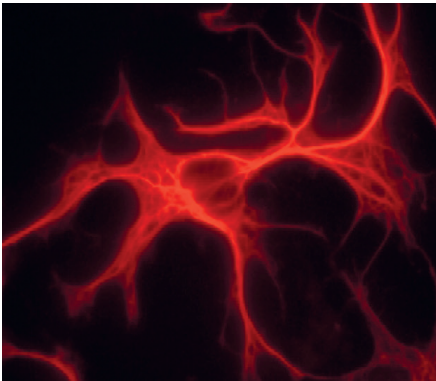


Рис. 2.12. Микрофотографии астроцитов [Найдены, 2013]

нии внимания на память удалось установить благодаря мышам с мутацией. У них астроциты были неспособны реагировать на стимуляцию, и эффект внимания полностью пропал.

Наряду с другими вспомогательными клетками (клетками глии) и нейронами, астроциты были открыты в конце XIX века. В начале XX века в работах Сантьяго Рамон-и-Кахаля была сформирована доктрина, согласно которой ключевая роль в работе мозга отводилась нейронам, а клетки глии рассматривались лишь как вспомогательные. Им отводилась роль электрических изоляторов или накопителей питательных веществ. В последние годы представление о роли клеток глии в мозге существенно расширилось. Например,

выявлена роль астроцитов как «чистильщиков» «бесполезных» связей между нейронами.

Американские нейробиологи [Chung, Clarke, Wang et al., 2013] описали механизм удаления лишних синапсов у нервных клеток и выяснили, что будет происходить, если этот процесс отключить. Им удалось установить два ключевых белка для удаления синапсов: MERKTK и MEGF10. Методами генной инженерии они создали мышей, у которых не было обоих белков. В результате вскоре после рождения у мышат образовалось множество лишних связей между клетками сетчатки и латеральным колленчатым телом (отделом мозга, где сигнал передается от сетчатки к зрительной коре). Вместо того чтобы получать информацию только от одного глаза, нейроны оказались соединены с сетчаткой обоих глаз: ученые узнали это, пометив нервные волокна флуоресцентными красителями. Далее исследование показало, что деградация лишних синапсов происходит с участием рецепторов, аналогичных макрофагам, по своей специфике процесс напоминает фагоцитоз. Отличие состоит в том, что астроциты поглощают не все синапсы без разбора, а только некоторые из них. Повышенная электрическая активность в синапсе не предотвращает деградации, а увеличивает ее вероятность. Каким образом астроциты «узнают» нужные синапсы, пока остается неясным. Исследователи обнаружили, что уменьшение активности клеток снижает число контактов, уничтожаемых астроцитами, но не смогли найти маркеры, позволяющие сохранить синапс и связь между нейронами.

От других нервных клеток нейрон отличается тем, что способен генерировать потенциал действия за счет ионных каналов, при открытии которых ионы натрия или калия устремляются в клетку. На мембране одного нейрона могут одновременно находиться тормозные и возбуждающие синапсы. Мембрана возбуждающих синапсов пропускает как ионы натрия, так и ионы калия. Мембрана тормозных синапсов пропускает только ионы хлора и гиперполяризуется. Если нейрон находится в покое, натриевые каналы мембраны закрыты. Соответственно, на мембране регистрируется потенциал покоя порядка  $-70$  мВ (отрицательный заряд цитоплазмы). Если нейрон заторможен, потенциал мембраны увеличивается (происходит гиперполяризация). Если уменьшить поляризацию мембраны примерно на 10 мВ, натриевый ионный канал открывается и из межклеточной среды в цитоплазму нейрона устремляются ионы натрия, которых там примерно в 50 раз больше, чем в цитоплазме. Чем больше ионов натрия войдет в цитоплазму нейрона, тем больше его мембрана деполяризуется. Потенциал на мембране будет увеличиваться, открывая все большее количество натриевых каналов (рис. 2.13).

Потенциал будет расти не бесконечно, а только до тех пор, пока не станет равным примерно  $+55$  мВ. Данное значение соответствует присутствующим в нейроне и вне его концентрациям ионов натрия, поэтому его называют

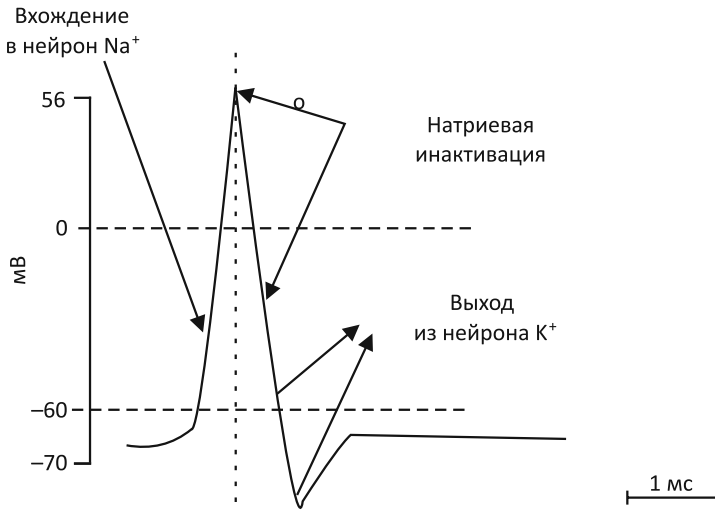


Рис. 2.13. Возбуждение нейрона [Шульговский, 2000, с. 20]

натриевым равновесным потенциалом. Таким образом, если в покое мембрана имела потенциал  $-70$  мВ, то абсолютная амплитуда потенциала окажется около  $125$  мВ. Длительность потенциала действия (генерации возбуждения на мембране нейрона) составляет около  $1$  мс ( $1/1000$  с). В зависимости от характера открытых ионных каналов возникает возбуждательный (открываются каналы для ионов натрия и калия) или тормозной (открываются каналы для ионов хлора) постсинаптический потенциал.

Высокую проводимость нервного импульса обеспечивает миелинизация нервных волокон — покрытие нервного волокна миелином. Последний примерно на  $2/3$  состоит из жира и является хорошим электрическим изолятором. У новорожденного ребенка миелинизировано примерно  $2/3$  волокон головного мозга. Следующий этап миелинизации завершается примерно к  $12$  годам, что соответствует формированию произвольности, в первую очередь произвольного внимания. Процесс миелинизации полностью заканчивается только вместе с половым созреванием. Таким образом, процесс миелинизации является показателем созревания ряда психических функций. Дегенерация миелиновой ткани сопровождается тяжелыми нарушениями в работе нервной системы. Самым известным заболеванием, развивающимся на основе демиелинизации, является рассеянный склероз.

Передача возбуждения от одного нейрона к другому осуществляется посредством нейромедиаторов (нейротрансмиттеров) — биологически активных веществ. Среди них наиболее известен ацетилхолин, открытый в 1930-х годах австрийским ученым О. Леви. Ацетилхолин замедляет сокращение мышц. Соединение весьма широко распространено в живой природе, например нахо-

дится в стрекательных капсулах крапивы, в стрекательных клетках кишечнополостных животных (пресноводной гидры, медузы) и др.

Важную группу нейромедиаторов составляют биогенные амины: дофамин, серотонин, адреналин и норадреналин. В организме биогенные амины выполняют медиаторную, гормональную, регуляторную функции.

О важности участия транзиттеров в работе головного мозга свидетельствуют заболевания, которые возникают в случае нарушения их производства. Так, болезнь Паркинсона, проявляющаяся как дрожательный паралич, вызвана разрушением в мозге большого нейрона, которые в своих синапсах (окончаниях) выделяют дофамин. Тела этих нейронов (в настоящее время известно шесть типов) находятся в среднем мозге, образуют там скопление, которое называется черной субстанцией. У пациентов, страдающих хронической бессонницей, обнаружено снижение концентрации серотонина в мозге.

Адреналин и норадреналин называют гормонами стресса. Их активное выделение характерно для состояния мобилизации в ситуации умственного и нервного напряжения. Основным источником норадренергических аксонов являются нейроны голубого пятна и прилежащих участков среднего мозга. Аксоны этих нейронов образуют широко разветвленную сеть, проникая в мозговой ствол, мозжечок и большие полушария, в нервную периферическую систему. В продолговатом мозге крупное скопление норадренергических нейронов находится в вентролатеральном ядре ретикулярной формации. В промежуточном мозге (гипоталамусе) норадренергические нейроны, наряду с дофаминергическими нейронами, входят в состав гипоталамо-гипофизарной системы.

У млекопитающих дофаминергические нейроны находятся преимущественно в среднем мозге (нигро-неостриарная система) и в гипоталамической области. Серотонинергические нейроны широко распространены в центральной нервной системе. Они обнаруживаются в составе дорсального и медиального ядер шва продолговатого мозга, в среднем мозге и варолиевом мосту. Серотонинергические нейроны иннервируют обширные области мозга, включающие кору больших полушарий, гиппокамп, бледный шар, миндалину, область гипоталамуса. Содержание серотонина в эпифизе контролируется циклом «свет — темнота» через симпатическую нервную систему.

Отдельную группу активных веществ, продуцируемых мозгом, составляют эндорфины (сокращенно от «эндогенные морфины»). Эндорфины относятся к группе опиоидных пептидов — морфинам, синтезируемым самим организмом. Они блокируют передачу импульсов боли, усиливают эмоционально позитивное восприятие реальности, а в высокой концентрации вызывают чувство эйфории. Существует несколько видов эндорфинов. На эмоции и двигательную активность влияют альфа-эндорфины, в то время как гамма-эндорфины, наоборот, снижают эмоциональную активность. Бета-эндорфины — самый активный агент взаимодействия с опиоидными рецепторами, они отвеча-



ют за обезболивание и активацию системы вознаграждения. Бета-эндорфины первыми реагируют на воспалительные процессы. Современные исследования функциональной активности нервных клеток показывают, насколько сложен эволюционный путь развития мозга и нейрофизиологический механизм психической деятельности.

### 2.3. Развитие головного мозга в онтогенезе

В образовании особенности развития человека, его когнитивных способностей всегда рассматривались как одна из предпосылок успешности обучения. Сегодня хорошо известно, что после рождения человека развитие мозга активно продолжается. Нейрональные паттерны структур головного мозга, обеспечивающих психическую деятельность человека, активно формируются в первые годы жизни, реагируя на богатство и сенсорное разнообразие среды. В детском возрасте они значительно дифференцируются и расширяются. Созревание структур мозга имеет место и в юношеский период.

Возникают вопросы:

- Насколько по-разному видят и воспринимают мир взрослые и новорожденные, дети раннего возраста, воспитывающиеся в разных условиях?
- Какова динамика структурно-функциональных изменений в онтогенезе и чем они в большей степени обусловлены: социумом или биологией индивида?

Эксперименты на животных показали, что многие свойства зрительной системы заложены с рождения, но развитие этих способностей зависит от условий жизни в дальнейшем. Например, у котят в возрасте 1–2 недель избирательные свойства корковых нейронов уже сформированы, то есть они образовались исключительно за счет генетических программ в отсутствие зрительных стимулов (котят еще слепые). Если у котенка в течение первых 2–3 месяцев жизни исключить предметное зрение, например одним глазом, то нейроны коры, соответствующие этому глазу, теряют ориентированные зрительные поля. Отсюда был сделан вывод, что свойства корковых нейронов определяются исключительно внутрикорковыми связями. Период, когда котята чувствительны к депривации, начинается спустя 4–5 недель после рождения и длится до 6–8 недель [Шульговский, 2000]. У низших обезьян этот период значительно дольше: начинается через 1–2 месяца после рождения и продолжается до 1,5–2,0 лет. Наблюдения на людях подтверждают выводы экспериментальных исследований. Например, у человека удалена катаракта, образовавшаяся в раннем детском возрасте, предметное зрение не восстанавливается. Вместе с тем такого человека нельзя назвать полностью слепым: он различает свет и тем-

ноту. По-видимому, у человека формирование предметного зрения занимает до 15 лет.

Предполагается, что эволюционное развитие популяции нейронов шло от двух типов нейронов к сложным функциональным ансамблям посредством вставочных нейронов. В мозге человека 90% занимают полимодальные нейроны. Именно их эволюционное развитие обеспечило человеку большую функциональную свободу психической активности за счет неспецифичности полимодальных нейронов в отличие от мономодальных (специфичных).

В головном мозге человека полимодальные нейроны объединены в неспецифические системы ствола головного мозга (задний, средний, продолговатый), обеспечивая систему трансмиссии тормозных и возбуждающих активаций по восходящим и нисходящим путям. В онтогенезе, на стадии эмбрионального развития, структуры мозга формируются из переднего, среднего и заднего мозговых пузырей. Развиваясь, передний мозговой пузырь трансформируется в большой и промежуточный мозг, средний — в средний мозг, где преобладают мономодальные нейроны, задний — в задний и продолговатый мозг.

Важными закономерностями развития мозга являются неравномерность созревания отдельных зон и гетерохронность. В последнем случае имеется в виду наличие циклов с несколькими развивающимися связями и всплесками, а также прекращение роста отдельных связей. Например, часть префронтальной коры, поддерживающей оперативную память, развивается отдельно от части затылочной коры, отвечающей за анализ визуальной информации. При этом всплески и перерывы в развитии обеих зон происходят в сходные возрастные периоды.

Сегодня исследования развития мозга позволяют сделать вывод, что традиционные представления об этом процессе лишь частично отражают характер происходящих изменений. Традиционно развитие рассматривается как линейное, наподобие лестницы, по которой человек поднимается последовательно, шаг за шагом, на более высокие уровни развития когнитивных функций. Практически во всех психологических периодизациях развития в качестве опоры используется какой-либо один процесс, лежащий в основе развивающейся функции (например, стадии развития мышления по Ж. Пиаже), или несколько процессов, при условии что сначала доминирует один, затем другой (например, общение и познание, как в концепции Д. Б. Эльконина). На этой воображаемой лестнице стадии развития предполагают пересечение всех развивающихся сфер во всех областях обучения и поведения — от умения решать арифметические задачи до реагирования на социальные проблемы в зрелости. Однако анализ реального развития, когда одновременно развиваются и пересекаются несколько областей, показывает ошибочность такой точки зрения [Fischer, Bidell, 2006]. Дети демонстрируют разные возможности в разных областях. Только применительно к одной сфере, одной

области способностей можно говорить об относительно единой последовательной схеме развития.

Уже в 1994 году были получены доказательства того, что процесс роста цикличен и имеет системную (систематическую) локализацию в мозге, а не является одиночным одновременным рывком во всех областях мозга [Thatcher, 1994]. Левое и правое полушария развиваются в различных последовательностях, которые повторяются для каждого цикла реорганизации коры [Fischer, Rose, 1996]. То, что на первый взгляд кажется единым процессом, на самом деле разнообразный набор индивидуальных процессов, происходящих совместно. Именно эту точку зрения излагает динамичный подход к анализу развития мозга и психических функций в онтогенезе.

Большинство исследователей считают более прогрессивным динамичный подход. Динамичный подход фактически включает два измерения: последовательность и изменчивость. Последовательное движение в домене может идти разными путями внутри домена, а также разными путями между доменами. Визуальным воплощением этой концепции является сложная сеть (рис. 2.14).

Изменчивость в поведении позволяет выявить некоторые закономерности, связанные с тем, что на определенных возрастных этапах у детей происходят быстрые изменения производительности в определенных областях.

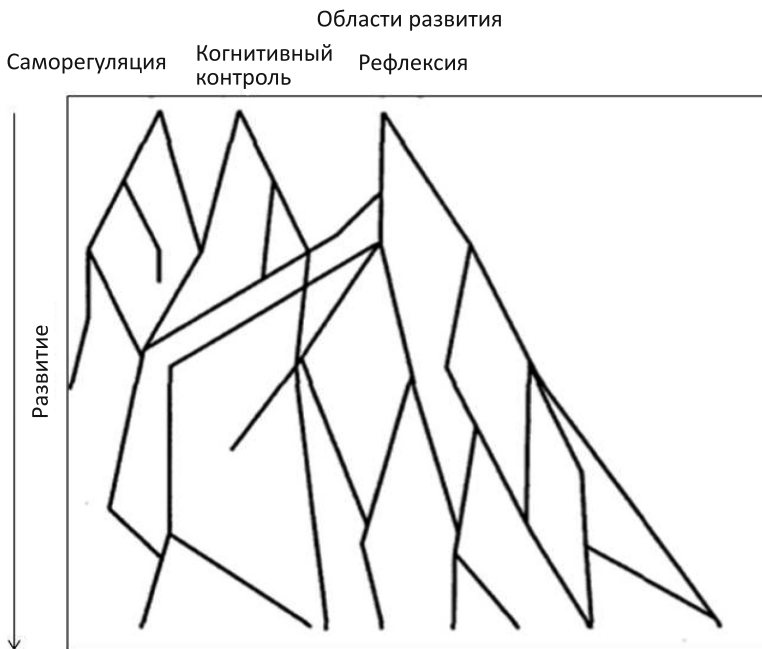


Рис. 2.14. Развивающаяся сеть доменов исполнительской функции [Fischer, Daley, 2006, p. 61]

Например, такие всплески были зарегистрированы в исследованиях эффективности суждений у подростков и взрослых, в использовании детьми местоимений при овладении речью [Ruhland, van Geert, 1998]. Эти периоды бурного развития приурочены к определенному возрасту, когда имеет место оптимальная производительность. Например, в возрасте около 2 лет дети демонстрируют резкий прогресс: осваивают лексику, начинают говорить предложениями, совершенствуются в игровой деятельности. При этом для развития человеку нужно соответствующее окружение, специально организованное обучение.

В разные возрастные периоды наблюдаются схожие всплески электрической активности (альфа-частот на ЭЭГ). Сходство кривых роста ЭЭГ энергии и когнитивных функций указывает на связь между развитием мозга и поведением. Этот факт позволил предположить, что рост всплесков на ЭЭГ отражает процессы реорганизации мозга, свидетельствующие о новых возможностях в определенном возрасте [Matousek, Petersen, 1973]. Развитие навыков оценивается по общей шкале сложности, где отмечен возможный уровень развития умения. При наличии поддержки (помощи) они прирастают скачкообразно на оптимальном уровне. Без поддержки они растут непрерывно на функциональном уровне. Уровни определены следующим образом:

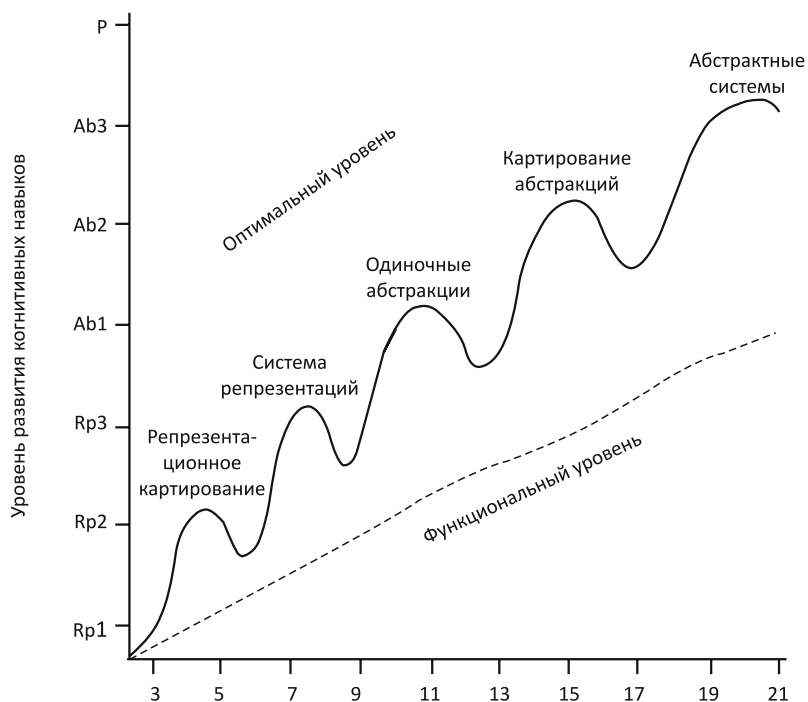


Рис. 2.15. Оптимальный и функциональный уровни в когнитивном развитии

- репрезентационное картирование (representational mapping) — накопление опыта чувственного познания, представлений;
- упорядоченные системы представлений (representational systems);
- построение единичных простых абстрактных понятий (single abstraction);
- абстрактное картирование (abstract mapping) — овладение знаковыми системами и логическими операциями, развитие понятийного ряда;
- формирование понятийной системы (abstract systems) — развитие семантической сети, обеспечивающей работу абстрактно-логического мышления [Fischer, Daley, 2006, p. 63] (рис. 2.15).

Динамичный подход к развитию признает сходство в развитии разных областей, однако обращает внимание на существенные различия в созревании разных составляющих психики. Динамическое понимание развития представляется более точно объясняющим его суть, а следовательно, и проблемы, которые возникают в ходе обучения.

## 2.4. Современные нейрофизиологические методы неинвазивного изучения мозга человека

**Электроэнцефалограмма (ЭЭГ)** является одним из самых распространенных и доступных методов регистрации. Электрическая активность в коре головного мозга обнаружена физиологами еще в 1849 году, когда была выявлена электронегативность в месте разреза головного мозга лягушки и черепахи. Как метод отражения функциональной активности мозга человека ЭЭГ рассматривается с 1924 года, когда Г. Бергер впервые зафиксировал сигналы ЭЭГ у человека. В статье «Поверхностная электроэнцефалограмма человека» (1929) он описал результаты записи электрических феноменов, зарегистрированных с поверхности головы человека, которые он назвал волнами первого порядка, или альфа-волнами.

Диагностика и научные исследования мозговых процессов с помощью ЭЭГ основаны на свойстве неокортекса непрерывно продуцировать биоэлектрические сигналы, источником которых является активное состояние нервных клеток. Таким образом, ЭЭГ в основном представляет собой результат суммирования микродиполей — пар связанных равных по величине и противоположных по знаку зарядов, образованных пирамидальными клетками, ориентированными перпендикулярно к поверхности головы. Эта ориентация электрических диполей свидетельствует о наибольшей чувствительности ЭЭГ к радиально расположенным источникам.

В целом электрическая активность коры состоит из длительных колебаний, которые широко варьируют по продолжительности. Они проявляются

как нерегулярные медленные потенциалы в отделах головного мозга. Наряду с ними, в коре есть сравнительно быстрые колебания потенциала, также меняющиеся по продолжительности. По амплитуде они обычно значительно ниже медленных. Медленные нерегулярные потенциалы и быстрые на их фоне характеризуют спонтанную активность всех частей коры больших полушарий при нормальном функционировании. Характер суммарной электрической активности зависит от структурно-функционального состояния мозга [Гнездицкий, 2004]. Ритмы ЭЭГ отличаются частотой, локализацией, механизмами генерации и функциональным значением.

В норме паттерны ЭЭГ состоят из разных частотных диапазонов: дельта-волны — от 0,5 до 4,0 Гц, тета — от 4 до 7 Гц, альфа — от 7 до 13 Гц (в некоторых статьях можно найти упоминание, что этот ритм определяется в диапазоне от 12 до 15 Гц), бета — от 13 до 35 Гц, гамма — от 35 Гц и выше. Обычно альфа-ритмы представляются как ритмы нормальной активности ЭЭГ человека. Они блокируются после открывания глаз или во время умственной активности некоторых типов, в связи с чем их часто именуют ритмами холостого хода. Альфа-ритмы поддерживают готовность к включению в активную деятельность (например, к сенсомоторной или когнитивной активности). Подавление альфа-ритма избирательно и проявляется в том полушарии, которое является доминантным для задач данного типа [Шишкин, 1997]. Альфа-ритм связан с процессами самоуправления, часто используется в задачах биоуправления собственной активностью. Межполушарная асимметрия альфа-ритма детерминирует точность выполнения задания, когда нужно определить, является ли последовательность букв словом или нет. Рост левополушарной альфа-активности оказался связан с уменьшением точности лексического определения, а снижение — с улучшением процесса распознавания слов [Zaidel, Hill, Weems, 2008].

В зависимости от уровня бодрствования и локализации дельта-колебания свидетельствуют либо о снижении уровня активности (сон), либо о локальной или диффузной церебральной дисфункции (кома, инсульт, мозговая травма, опухоль и др.).

Как и колебания в дельта-диапазоне, тета-волны отражают физиологически обусловленное снижение бодрствования, связанное с преобладанием тормозных процессов. В норме они встречаются у взрослых людей при утомлении или засыпании, а при патологии свидетельствуют о нарушении корковых и подкорковых процессов, чаще всего если есть дизэнцефальные образования (опухоль, кисты, гематомы и т. д.). Существуют данные о том, что тета-ритмы играют активную роль в обеспечении процессов памяти [Кропотов, 2010, с. 107] и отражают активность гиппокампальных структур (поля Бродмана 24, 32), работа которых необходима для консолидации эпизодической памяти. В связи с изложенным выше введен особый термин «среднелобный

тета-ритм». Он четко фиксируется вокруг лобной средней линии при решении задач, требующих вовлечения памяти (кодирование следов и извлечение из памяти).

Бета-ритм модулируется при выполнении двигательных и когнитивных задач. Например, паттерны бета-колебаний регистрируются в центрально-теменных отведениях при нажатии кнопки (при выборе ответа). Бета-ритм лобной локализации регистрируется при решении когнитивных задач, связанных с оценкой стимула или принятием решения [Кропотов, 2010, с. 88]. Степень увеличения лобного бета-ритма зависит от трудности задачи. В задачах, связанных со зрительной модальностью, бета-синхронизация может наблюдаться не только в соматосенсорных и лобных областях, но и в затылочных областях коры. Диапазон бета-ритмов характеризует преобладание и/или усиление процессов возбуждения. В норме у взрослого человека, находящегося в состоянии расслабленного бодрствования, амплитуда бета-ритма обычно значительно ниже, чем амплитуда альфа-ритма. Доминирование бета-активности связано с активизацией умственной деятельности, решением сложных когнитивных задач, но может следовать за перевозбуждением или воздействием различных медикаментов.

Гамма-ритмы ( $> 30$  Гц) имеют низкую энергию, в связи с чем их трудно записать.

Помимо ритмов, в исследованиях и клинической практике могут встречаться описания других колебаний:

- **Мю** ( $\mu$ ) ритм — та же частота, что и альфа, но имеет другую пространственную организацию (максимум в центральных отделах), форму, реактивность, блокируется при произвольных движениях, связана с сенсомоторной корой [Jasper, Andrews, 1938].
- **Лямбда** ( $\lambda$ ) волны — колебания, возникающие в задних отделах при следящих движениях глаз [Gastaut, 1951; Evans, 1952].
- **Каппа** ( $\kappa$ ) — колебания в альфа-диапазоне с максимумом в передне-височных отделах [Laugier, Liberson, 1937].
- **Пи** ( $\pi$ ) — медленные колебания (3–4 Гц) в задних отделах мозга [Dutertre, 1977], отличающиеся от основного затылочного ритма и не являющиеся его гармоникой.
- **Фи** ( $\phi$ ) — медленные колебания дельта-диапазона в задних отделах, характерно возникающие при закрытии глаз [Belsh, Chokroverty, Varabas, 1983].
- **Сигма** ( $\sigma$ ) — колебания, аналогичные «сонным веретенам» [Kugler, 1981].
- **Ро** ( $\rho$ ) — колебания, аналогичные позитивным затылочным острым компонентам (POSTS) [Kugler, Laub, 1971].

Специфика ЭЭГ как метода исследования заключается в обработке ритмической электрической активности мозга таким образом, чтобы выделить локализацию функциональной системы и выявить особенности взаимодействия составляющих ее структур. Существует много теорий, в чем состоит природа данных ритмических процессов, основанных на изучении электрической активности как отдельных нейронов, так и их паттернов. Установлено, что нейроны, даже близко расположенные, обладают разной активностью.

Сегодня ритмы ЭЭГ считают прямым показателем того, что нейроны мозга синхронизируют свою активность сложным образом, позволяя системе функционировать как единое целое. Нейроны работают в едином динамическом соотношении, и изменение соотношений на разных уровнях организации межуровневых отношений влияет на ритмическую активность, что является прямым отражением изменения функционального состояния. Идея образования функциональной связи между отделами мозга как отражения процессов синхронизации их электрической активности служит основой современных методов ЭЭГ.

Для регистрации ЭЭГ используется электроэнцефалограф (рис. 2.16), состоящий из электродной части (количество каналов варьирует: 19, 21, 64 и т. д.), системы усилителей и регистрирующей части. Существуют разные способы отведения, поэтому при работе с системой необходимо тщательно изучить ее возможности и ограничения. В международной практике установлена обязательная запись по системе 10–20 в монополярном или биполярном режиме.

Регистрируемые электроэнцефалографом ритмы развиваются во времени: растут и убывают. Обычно при анализе фоновой ЭЭГ в качестве репрезентативного рассматривается интервал 3 минуты и более, так как в интервалах длиной несколько секунд трудно оценить всю информацию о ритмах. Для анализа применяются следующие методы: преобразование Фурье (спектральный анализ с выделением спектров амплитуд и спектров мощности), вычисление когерентности ЭЭГ (степень/мера синхронизации между различными отведениями, характеризующая наличие связи между нейронами и функциональными зонами), расчет индексов синхронизации/десинхронизации, волновое (вейвлет) преобразование (анализ временной динамики колебания сигнала), анализ независимых компонент (выявление источников генерации электрической активности).

Метод вызванных потенциалов (ВП) предназначен для исследования динамики функциональной активности мозга при работе со стимулами или когнитивными задачами. В отличие от фоновой ЭЭГ, для регистрации ВП необходима четко регистрируемая связь между конкретным событием и активностью областей мозга. Сумма синхронно генерируемых и связанных с событием постсинаптических потенциалов регистрируется в виде компоненты (отклонения) вызванных потенциалов с поверхности головы, ограничена во времени



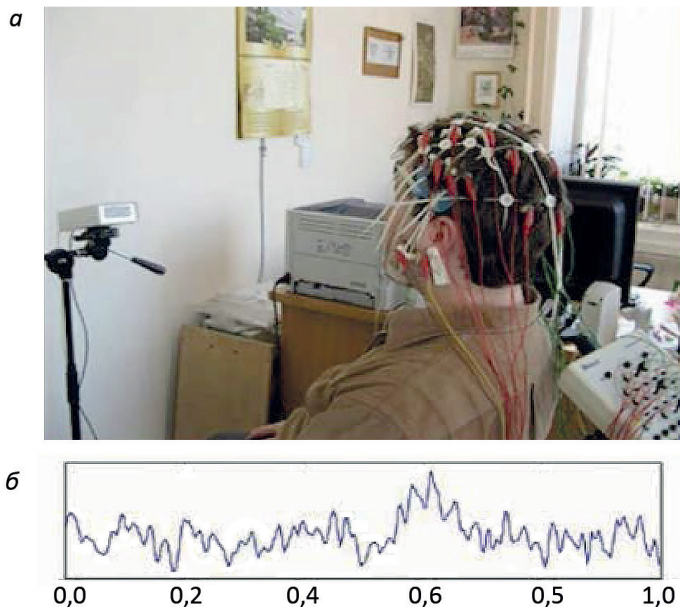


Рис. 2.16. Электроэнцефалографическое исследование функционального состояния мозга:

*а* — проведение записи ЭЭГ; *б* — схематизированный пример записи ЭЭГ

и пространственно локализована. Для того чтобы выделить вызванные потенциалы из фоновой ЭЭГ, необходимо усреднить большое количество участков, соответствующих воздействию стимула.

Все группы потенциалов принято называть связанными с событиями потенциалами (ССП). ССП экстрагируются из электроэнцефалограммы путем усреднения сигналов, возникающих одновременно с презентацией стимула. Для психологии и нейродидактики методы ВП и ССП имеют существенное значение, поскольку позволяют установить связь между конкретным заданием, набором психологических операций (детекцией, распознаванием стимулов, обновлением рабочей памяти, подавлением действия, мониторингом результата действия и др.) и временным появлением паттернов активации/деактивации нейронов в определенных областях мозга. Существует несколько компонент ВП, которые регистрируются только в определенных исследовательских парадигмах конкретных паттернов поведения. В соответствии с предполагаемой функцией ВП имеют условные обозначения. Первая буква означает модальность потенциала: положительный (позитивный) — Р или отрицательный (негативный) — N. Далее указывается временной диапазон возникновения пиковой активности. Например, ВП «Р100» — позитивный (поло-

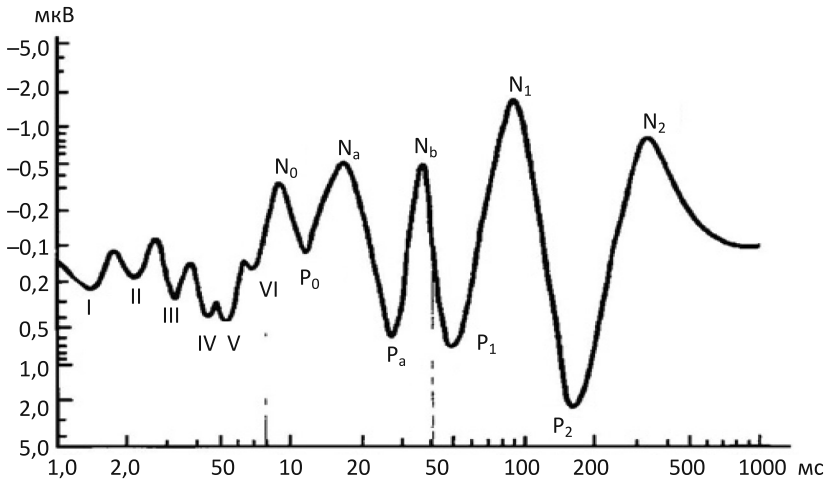


Рис. 2.17. Выделение усредненных компонентов P100 и N100

жительно заряженный) потенциал, регистрируемый при пиковой активности на сотой миллисекунде (рис. 2.17).

Многочисленные исследования позволили соотнести основные компоненты, выделяемые в различных поведенческих парадигмах (табл. 1), с определенными психическими функциями. Ранними называются ВП, которые возникают и регистрируются до 200 мс, поздними — после 200 мс. Ранние компоненты ВП соотносятся с автоматизированными действиями, протекающими без участия сознания. После 200 мс начинаются процессы когнитивной обработки информации, в том числе процессы внимания (произвольного мониторинга, памяти, семантики и т. д.), что свидетельствует о переходе с бессознательного уровня обработки информации к осознанному.

Основными парадигмами исследований на основе ВП являются парадигма необычного стимула<sup>2</sup>, негативность рассогласования<sup>3</sup>, Go/No-Go<sup>4</sup>. Изучение когнитивных вызванных потенциалов, в том числе сверхпоздних волн, осуществление сложных видов умственной деятельности — целеполагания, планирования и т. д. — является отдельной проблемой.

<sup>2</sup> Экспериментальная методика, разработанная для исследования связи между вниманием к стимулам (обычно слуховым) и вызванными потенциалами, предполагает на фоне предъявления стандартных стимулов появление в случайном порядке необычных стимулов (по тональности, громкости и т. д.).

<sup>3</sup> Парадигма связи вызванных потенциалов и события предполагает презентацию нечеткого или девиантного события (зрительного или слухового), встроенного в поток повторяющихся, стандартных или знакомых событий.

<sup>4</sup> Go/No-Go — экспериментальная парадигма, предполагающая выполнение или торможение действия в ответ на предъявляемые стимулы (чаще всего используется для исследования компонент отвлечения или вовлечения).

Таблица 2.1. Основные параметры когнитивных вызванных потенциалов

Пик	Функциональное действие при обработке информации	Анатомическое расположение
<i>Ранние ВП (автоматизированные действия)</i>		
P100	Зрительная компонента ВП: перемещение взгляда, зрительное внимание. Ранняя сенсорная обработка	Поля 17, 18 по Бродману (шпорная борозда)
	Слуховая компонента ВП: слуховое сосредоточение и направленное внимание. Ранняя сенсорная обработка	Поле 41 по Бродману (извилина Гешля)
N100-P100-N200 (N1-P1-N2)	Зрительная компонента ВП: ассоциативная область зрительного анализатора	Поля 18, 19 по Бродману
	Слуховая компонента ВП: ассоциативная область слухового анализатора	Поля 41, 42 и 22 по Бродману
<i>Поздние ВП (когнитивная оценка информации)</i>		
P200	Первичная дифференциация	Лобно-центральные области, таламус, стволые структуры
N200	Сравнение с известными образами и первичное распознавание	Затылочная, теменная, височная области
P250-P270	Рабочая память	Визуальная задача памяти: фронтальная область ответственна за выполнение задачи, а затылок — за визуальное соподчинение
P300	Мыслительная обработка в течение восприятия стимула, перевод в кратковременную рабочую память, обновление содержания. Принятие решения	Лобная доля
P300a (P3a)	Допаминергический механизм при решении задачи. Мозговые механизмы внимания	Лобная кора, предцентральная извилина
P300b (P3b)	Деятельность, связанная с вниманием, обработкой запоминанием, — холинергический механизм	Темпоропариетальная активность
P300b (P3b)	Волна P3b связана с высшими корковыми функциями многих видов, включая оценку значимости стимула, перераспределение внимания и переработку информации перед ее перемещением из кратковременной в долговременную память, принятие решения	Темпоропариетальная активность

Пик	Функциональное действие при обработке информации	Анатомическое расположение
N400	Семантическая обработка, доступ к семантической памяти, перевод из оперативной памяти в долговременную память. Комплексная согласованность ответа с памятью и семантическим планом высказывания, лексика	Гиппокамп, височная и нижняя лобная извилины
P500-P800	Декларативная память	Гиппокампальные структуры, префронтальная кора
P600	Синтаксис. При грамматическом паттерне у здоровых пик P600 присутствует, при поражении подкорки P600 нет [Drenhaus, beim Graben, Frisch et al., 2005]	Базальные ганглии
—	Удлинение латентности и снижение амплитуды	Задержка в познавательной обработке информации, нарушение процессов селективного внимания, асинхронная активация генераторного потенциала корково-подкорковых связей
—	Высокая амплитуда	Нарушение кратковременной памяти, высокий уровень тревоги

**Магнитная энцефалография (МЭГ)** — метод регистрации суммы магнитных полей, возникающих в сети электрических диполей. Эти диполя соответствуют электрическим потенциалам групп пирамидных нейронов, расположенных параллельно поверхности головы, то есть в извилинах. В отличие от электрических сигналов, магнитные поля не искажаются при прохождении через оболочки мозга, кости черепа и мягкие ткани головы. Несмотря на кажущиеся преимущества, МЭГ не является конкурентом ЭЭГ. МЭГ в основном регистрирует активность нейронов в бороздах мозга, а ЭЭГ отражает активность большей части корковых нейронов как в бороздах, так и на поверхности мозговых извилин. Таким образом, необходимо рассматривать их как взаимодополняющие методы.

**Компьютерная томография (КТ)** мозга позволяет получить точечные детальные изображения плотности мозгового вещества человека на основе рентгеновского излучения и компьютерной обработки результатов. Точность определения активированных участков мозга составляет до 1 мм. Исследование показывает распределение регионального мозгового кровотока, интенсивность обмена веществ в структурах головного мозга, изменения в тканях мозга и новообразования.

**Позитронно-эмиссионная трансаксиальная томография (ПЭТ-сканирование)** сочетает возможности компьютерной томографии и радиоизотопной диагностики, использующей ультракороткоживущие позитронизлучающие изотопы — метки, которые вводятся через дыхательные пути или внутривенно. ПЭТ-сканирование использует физические свойства изотопов — радиоактивных форм простых атомов (водород, кислород, фтор), которые, распадаясь, испускают позитроны. Радиоактивные атомы попадают в кровь, достигают мозга, после чего их потребляют клетки определенных областей мозга. Чем более активна зона мозга, тем больше радиоизотопов она поглощает. С помощью ПЭТ-сканирования измеряют локальный мозговой кровоток и метаболизм глюкозы или кислорода на отдельных участках мозга при функциональной нагрузке разных видов (физической, когнитивной, двигательной) или в состоянии покоя, позволяя картировать мозговой кровоток. Пространственное разрешение у ПЭТ-сканирования значительно ниже, чем у МРТ, что не позволяет различать малые структуры мозга, например ядра таламуса, на снимках ПЭТ-сканирования.

**Магнитно-резонансная томография (МРТ)** использует явление магнитного резонанса [Кропотов, 2010]. Если частица обладает электрическим зарядом, то, вращаясь, она ведет себя подобно крошечному магниту. В отличие от КТ, при МРТ создается магнитное поле, заставляющее атомы химических элементов, входящих в структуры нейронов и являющихся элементарными магнитами, вращаться в определенном направлении. После прекращения потока электромагнитных волн атомы возвращаются в исходное положение и излучают волны, их регистрируют магнитные детекторы томографа. Регистрируемые амплитуды радиоволн выступают исходными данными для МРТ [Кропотов, 2010]. Используемые для анализа математические методы позволяют визуализировать получаемые данные. На основе массива данных моделируется трехмерное изображение участков мозга посредством регистрации радиочастотного излучения частиц, помещенных в постоянное магнитное поле.

**Ядерно-магниторезонансная томография (ЯМР)** — более совершенный метод по сравнению с МРТ. Находят распределение плотности ядер водорода (протонов) в мозговом веществе и регистрируют некоторые характеристики с помощью мощных электромагнитов, расположенных вокруг тела человека. Преимущество ЯМР-томографии — отсутствие ионизирующего излучения (как при КТ или МРТ). С ее помощью можно получить четкие изображения «срезов» мозга человека в различных плоскостях в динамике изменений функциональных состояний.

**Метод функционального магнитного резонанса (ФМРТ)** представляет собой сочетание метода ЯМР с измерением мозгового метаболизма с помощью позитронно-эмиссионной томографии. Основу составляет регистрация изменения гемодинамики областей мозга, где наблюдается локальная ак-

тивность нейронов. Его применение расширяет возможности прижизненного исследования структурных и функциональных особенностей мозга.

Ядерно-магниторезонансная томография и функционально-магниторезонансная томография мозга (ФМРТ) являются более совершенными методами неинвазивного комплексного исследования структуры, метаболизма и кровотока мозга по сравнению с МРТ.

**Транскраниальная микрополяризация (ТКМП)** позволяет исследовать функциональную активность мозга посредством воздействия малого постоянного тока (до 1 мА), тем самым изменяя функциональное состояние отдельных зон мозга. Это направление нейрофизиологических исследований связано со стимуляционными манипуляциями: непосредственное воздействие электрического тока на нейронные сети оказывает модулирующее влияние на работу мозга. Многие исследования показывают, что анодная ТКМП является активирующей процедурой, в то время как катодная — тормозящей. В настоящее время ТКМП используется в научных исследованиях с целью доказать функциональное значение определенных зон мозга. Если предполагается, что их активация способствует успешности запоминания слов, то при подавлении активности этой зоны катодным током должно фиксироваться снижение мнемической продуктивности, а при стимулировании анодными микротоками — повышение.

**Транскраниальная магнитная стимуляция (ТМС).** В отличие от ТКМП, в ТМС для стимуляции (или подавления) активности нейронов определенных зон коры используются электромагнитные поля.

Краткий обзор неинвазивных нейрофизиологических методов исследования мозга не дает возможность полностью раскрыть их преимущества и ограничения. Однако даже такой поверхностный анализ позволяет сделать вывод о безопасности и информативности каждого из них. Совершенно ясно, что наиболее безопасными для человека являются ЭЭГ и МЭГ, так как они не оказывают воздействия и регистрируют лишь исходящие электрические или электромагнитные импульсы со скальпа. Получаемые на их основе данные менее точные и подлежат интерпретации с осторожностью, так как не позволяют провести прямую проекцию текущей активности зон мозга и регистрируемых параметров, что может исказить результаты и требовать многочисленной репликации данных. Одновременно регистрируется множество артефактов (напряжение мышц, кожно-гальванические и сосудистые реакции, электрические наводки и др.), продуцируется сочетанная регистрация сигналов, связанных с активностью соответствующей зоны коры, и сигналов от других структурных образований, расположенных глубже под этой зоной коры. Мобильность, отсутствие воздействия, способного причинить вред здоровью, возрастных ограничений и противопоказаний для включения испытуемых в исследования являются значимыми факторами, когда исследователь выбирает метод исследования.

### Контрольные задания

1. Составьте таблицу, соотносящую определенные зоны мозга, их функциональную спецификацию и психические процессы, обеспечивающие эффективное обучение.
2. Составьте пример нейронных сетей, содержащий все варианты взаимодействия между нейронами.
3. Подберите несколько статей, опубликованных за последние 5 лет, в которых раскрываются процессы развития мозга в онтогенезе и описываются особенности становления когнитивных функций на разных этапах взросления человека. Предложите вариант использования этой информации в образовательной практике.
4. Опишите возможности и ограничения каждого неинвазивного метода исследования мозга. Приведите примеры дизайна нейрофизиологического исследования когнитивных процессов (решения определенных задач), где тот или иной метод был бы оптимальным.

### Использованная литература

1. *Гнездицкий В. В.* Обратная задача ЭЭГ и клиническая электроэнцефалография (картирование и локализация источников электрической активности мозга). М.: МЕДпресс-информ, 2004. 624 с.
2. *Жуков Д. А.* Биология поведения. Гуморальные механизмы. СПб.: Речь, 2007. 443 с.
3. *Краснощекова Е. И.* Модульная организация нервных центров. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2008. 130 с.
4. *Кропотов Ю. Д.* Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк: Издатель Заславский А. Ю., 2010. 512 с.
5. *Хомская Е. Д.* Нейропсихология. СПб.: Питер, 2006. 496 с.

## Глава 3

# Нейрофизиологические механизмы когнитивных и метакогнитивных процессов усвоения учебной информации

С точки зрения обучения в области закономерностей функционирования мозга наибольший интерес представляют процессы, связанные с когнитивной переработкой информации (нейрофизиологическими механизмами восприятия, памяти, внимания), решением когнитивных и творческих задач, управлением познавательной деятельностью и контролем над ней. Обучение ориентировано на поиск оптимальных способов работы с информацией. В условиях информационной и умственной нагрузки, когда постоянно появляются новые электронные образовательные ресурсы, человеку приходится перерабатывать потоки информации, способность человека осознавать ее, усваивать, извлекать новое становится важным умственным умением, обеспечивающим успешность обучения. Очевидно, если это умение формируется на основе нейрофизиологических механизмов, законов структурно-функциональной организации когнитивной деятельности мозга, то мы можем достичь целей обучения более эффективно.

Для оптимизации процесса образования и повышения эффективности усвоения учебного материала могут быть использованы результаты нейроисследований. Мозг обладает высокой нейропластичностью: нейроны способны к регенерации (этот процесс называется нейрогенезом) [Deng, Aimone, Gage, 2010], под воздействием поступающей информации структуры мозга постоянно перестраиваются. Эти процессы наиболее быстро протекают в первые годы жизни, но сохраняются и в дальнейшем. Соответственно, любой получаемый опыт помогает формировать нейронные цепи, которые определяют способы и результаты обучения в будущем. При этом регенерация нейронов повышает качество обучения и памяти, а физические упражнения стимулируют нейрогенез. Движение и физические упражнения увеличивают производство жизненно важного вещества — нейротропного фактора мозга (белка, кодируемого у человека геном BDNF). Этот белок относится к нейротрофинам, веществам, стимулирующим и поддерживающим развитие нейронов. Он содействует выживанию существующих нейронов и стимулирует рост новых, что очень важно для долгосрочной памяти. Кроме того, движение и физические упражне-



ния улучшают настроение и повышают когнитивную обработку информации [Ratey, 2008].

Вызывает сомнение тезис, что мозг способен работать одновременно над несколькими задачами. То, что ошибочно называется многозадачностью, на самом деле является выполнением альтернативных задач. Мозг сосредоточен на одной задаче в определенный период времени, переключает свое внимание с одной задачи на другую, а затем возвращается к первой. Однако каждое переключение — источник повышенного умственного напряжения, потенциально несущего угрозу потери информации о предыдущей задаче в рабочей памяти. Соответственно, человек выполняет две задачи хуже, чем одну [Sousa, 2011]. В учебном процессе обычно решают несколько задач одновременно. Использование различных учебных стратегий помогает учащимся сохранять вовлеченность в процесс обучения. Эффективной представляется тактика, когда переход от одного вида деятельности к другому происходит только после того, как первое задание выполнено до конца (а соответствующий материал усвоится).

Представления о пределах возможностей рабочей памяти обновлены благодаря новым данным. Ее потенциал (количество элементов, которое одновременно может в ней удерживаться) необъяснимо уменьшается в диапазоне от семи элементов до пяти. Таким образом, ключевым множеством является не  $7 \pm 2$ , а 5. Учитывая это, учителя должны представлять меньшее количество элементов на каждом уроке и обсуждать их более подробно, чтобы ученики с большей вероятностью усвоили (запомнили) их.

Циркадные ритмы — циклические колебания интенсивности различных биологических процессов, связанных со сменой дня и ночи. Сегодня лучше понимают, как они влияют на способность сосредоточиться. В частности, установлено, что во второй половине дня способность сосредоточиться естественно снижается от 45 до 30 минут. Соответственно, в разные периоды времени следует варьировать сложный для освоения материал. Кроме того, полноценный сон существенно влияет на работу рабочей памяти [Wilhelm, Diekelmann, Molzow et al., 2011]. Длительная нехватка сна (многие школьники приходят в школу не выспавшимися, особенно в средних классах) вызывает стресс, который сопровождается повышением уровня гормона кортизола в крови. Высокий уровень кортизола снижает способность сосредоточиться и ухудшает работу памяти.

Изучение иностранного языка облегчает изучение родного языка. Изучение двух языков одновременно помогает учащимся глубже понять их структуру. Необходимо как можно раньше начать обучение новому языку.

Картирование системы нейронных связей, вовлеченных в процесс чтения, позволило установить, что люди с высокоразвитым навыком чтения обладают разветвленной нейрональной сетью и используют различные нервные пути

во время чтения. У читателей, испытывающих трудности при чтении, этого не происходит [Shaywitz, 2003]. На основе указанных данных были разработаны научно обоснованные программы FastForWord и Earobics, помогающие маленьким детям, которым трудно научиться читать.

Эмоции существенно влияют на продуктивность обучения и запоминание. Они активируют системы внимания. Если содержание учебных курсов сопровождается активностью, которая вызывает эмоции, учебный материал запоминается лучше.

Гетерохронность в развитии мозга проявляется в том, что лобная доля, или часть мозга, которая отвечает за рациональность и прогнозирование поведения, полноценно развивается от 22 до 24 лет, в то время как эмоциональная часть мозга развивается примерно в 10–12 лет. Это существенное различие помогает лучше понять непредсказуемость поведения подростков.

Социальное окружение, среда и положительный эмоциональный климат имеют существенное значение для развития и обучения. В частности, воздействие искусства может улучшить внимание, пространственные навыки и творческие способности. Исследования в области социальной нейронауки свидетельствуют о необходимости уделять намного больше внимания социальному росту учащихся и фокусироваться на культурологическом аспекте преподавания и обучения. Интеллект и креативность не предопределены генетически, на их развитие могут повлиять среда и школьное образование. Таким образом, в образовательном процессе когнитивные способности учащихся могут быть улучшены или снижены [Sousa, 2011].

Даже краткий обзор некоторых достижений нейроисследований в области образования позволяет сделать вывод о том, что результаты исследований могут быть использованы в учебном процессе. Их внедрение и апробация требуют совместной работы педагогов, психологов и нейрофизиологов. Подобный междисциплинарный подход может сделать каждый этап обучения эффективнее.

Данные нейронауки могут оптимизировать тот аспект обучения, который связан с общими когнитивными способностями, выступающими психологическим основанием усвоения учебной информации. Традиционно к ним относят восприятие, внимание, мышление и память. У каждой способности специфическая роль в учебном процессе, каждая обеспечивает превращение информационного потока в знание, имеющее личностный смысл для обучающегося. В образовании роль метакогнитивных способностей выполняют универсальные учебные действия, отвечающие за планирование, целеполагание, исполнение, контроль и оценку выполняемых учебных заданий.

Строение функциональных систем мозга, их взаимодействие и механизмы развития/совершенствования обеспечивают продуктивную активацию когнитивных и метакогнитивных процессов, включенных в обучение. С их помощью можно объяснить способы работы мозга с поступающей информацией,

ее превращение в знание, раскрыть процессы управления своим поведением и познанием, творческие механизмы и закономерности принятия решения при работе с трудными или проблемными задачами.

### 3.1. Сенсорные системы

**Восприятие** учебного материала — это отражение в сознании обучающегося всей совокупности отдельных свойств учебного материала, частей и взаимосвязей друг с другом. Восприятие во многом обеспечивает понимание, осмысление учебного материала и предупреждает возможное последующее зазубривание. Корни мысли, подчеркивал И. М. Сеченов, лежат в «чувствовании». На нейрофизиологическом уровне окружающий мир отражается в постоянной активности нейронов сенсорных систем мозга, поддерживающих обработку воспринимаемой информации. Топографически каждая из первичных сенсорных областей характеризуется топографической организацией проекций (см. рис. 2.4).

В процессе познания окружающей действительности человек использует все пять органов чувств, то есть опирается на активность всех сенсорных систем. Тем не менее именно зрительная система обеспечивает более 80 % поступающей информации. Для учебного процесса ключевыми выступают зрительная и слуховая системы, которые обеспечивают практически полное восприятие информации. Зрение незаменимо в силу того, что позволяет узнать, *что* и *где* располагается в пространстве. Решение этих задач связано с развитием мозговых путей проведения зрительной информации разных видов.

Вентральный (височный) путь включает вентролатеральную престириарную кору (поля Бродмана 18 и 19) и нижневисочную кору. Основной задачей является первоначальное разбиение воспринимаемого объекта на отдельные компоненты, характеризующиеся размером, формой, текстурой, цветом и т. д. и создающие содержание зрительного осязания.

Дорсальный путь кодирует скорость и позицию зрительного объекта, организует зрительно управляемые моторные программы. Связь задних областей теменной коры с премоторными центрами лобной доли позволяет совершать ориентировочные и манипулятивные действия, например остановить взгляд на объекте (это незаменимо при овладении навыком чтения) или схватить объект [Кропотов, 2010, с. 203].

Дорсальные и вентральный пути обработки информации взаимодействуют на разных иерархических уровнях, что позволяет координировать обработку информации и формировать единый перцептивный образ. Одновременно в каждой системе образуются обратные связи, обеспечивающие возвращение информации от высших уровней к низшим. В пределах дорсального и вентрального путей различные характеристики объекта (пространственные отношения,

движение, форма, цвет, текстура и др.) обрабатываются в отдельных потоках, которые связаны с соответствующими функциями: распознаванием, установлением пространственных отношений, определением программы манипуляций.

Согласно модели окружающей среды как организующего фактора зрительного восприятия [Neisser, 1976], антиципирующая система (внутренняя модель мира) является превосходящей когнитивной структурой, обеспечивающей готовность воспринимать разные виды сенсорной информации. С самого раннего детства антиципирующая система формируется в соответствии с генетически детерминированной нейронной организацией в ходе активного взаимодействия с объектами окружающего мира. Таким образом, наше восприятие существенным образом зависит от сенсорного опыта. Модель окружающей среды не только управляет перцептивной активностью, но и сама видоизменяется в процессе восприятия. В настоящее время концепция Найссера была заменена научными представлениями репрезентации (памяти) объектов и их пространственных отношений (рис. 3.1). В сознании человека реальные объекты окружающей действительности существуют в виде репрезентаций — образов-проекций, в которых отражается ментальное пространство индивида (его опыт, знания, интерпретации, логика рассуждений и др.). Иными словами, образы, которыми оперирует человек, не есть прямое отражение реальности. Это его понимание реальности.

Обработка зрительных стимулов имеет свою спецификацию в зрительной коре. В частности, лица, буквы и слова ассоциированы с областями центра



Рис. 3.1. Репрезентация объектов при восприятии окружающей действительности

зрительного поля, ответственными за обработку информации, а изображения зданий — с периферическими зонами зрительного поля.

Принципы обработки информации в слуховой сенсорной модальности сформулированы в концепции множественных и параллельных путей, которая аналогична используемой при описании зрительной системы мозга, то есть систем «что?» и «где?». Поток «что?» связан с обработкой вокальных характеристик звуковой стимуляции и предположительно ответственен за идентификацию слухового объекта. Поток «где?» предназначен для локализации источника звука. На основе метода ВП было установлено, что активность нейрональных откликов в височной области отражает работу системы «где?». Активация областей задней поясной извилины, центральной и теменной коры связана с активностью системы «что?» слуховой модальности.

Топография восприятия речи характеризуется активацией левой передней верхневисочной долей. Данная область коры является полиспецифичной. Параллельно она получает множественные проекции от зрительных и сенсомоторных областей коры, что, «по всей видимости, обеспечивает возможность понимания смысла произносимых слов и высказываний» [Кропотов, 2010, с. 220]. Таким образом, зрительная и сенсомоторная стимуляции способствуют активации этой зоны мозга и, следовательно, улучшают семантический анализ речи и понимание отдельных слов. Такая стимуляция оптимизирует речевое развитие в раннем детстве. Сопровождение речи (объяснения, рассказа, лекции) зрительным подкреплением и моторным действием (например, иллюстрируем объяснение, используем видео, раскрываем суть абстрактного понятия посредством образа или символа, письменного описания, конспекта и т. д.) улучшает понимание услышанного.

Дополнительно следует отметить, что произнесение слов (артикулирование) генерирует звуки, которые кодируются слуховой системой мозга, включая области верхней височной доли, нижнюю моторную и смежную с ней нижнюю область префронтальной коры. Соответственно, звуки собственной речи способствуют формированию многочисленных связей между этими участками, обеспечивая не только лучшее понимание, но и контроль моторных речевых программ. Иными словами, обработка речевой информации идет более эффективно, если человек не только слышит ее, но и видит, проговаривает и совершает моторное действие (изображает, воспроизводит, описывает).

Когда мы описываем работу системы восприятия, мы обычно сосредотачиваемся на свойствах воспринимаемого объекта, то есть на том, каким образом формируется его целостный образ. Между тем вне нашего внимания остается процесс, который связан с детекцией изменений. Благодаря многообразию стимулов окружающей действительности сенсорная система мозга постоянно активирована. Однако многие стимулы остаются неизменными на протяжении довольно длительного времени, даже если изначально они явно

выделялись, то со временем перестают привлекать наше внимание (например, мы перестаем замечать шум за окном или неприятный запах; кстати, учитель тоже становится «привычным объектом»). Появление нового объекта, нарушение стабильности воспринимаемого (например, если преподаватель говорил, говорил и вдруг замолчал или до нас кто-то дотронулся) ведут к тому, что происходящие изменения будут замечены. Очевидно, мозг сравнивает текущую сенсорную картину с предыдущей, тем самым фиксируя любые изменения. Цель детекции изменений обусловлена функцией сенсорной системы — необходимостью выбрать источник изменения сенсорной информации для ее последующей детальной обработки. Как результат, активируются системы внимания.

Детекция изменений (операция сравнения) реализуется на уровне не только сенсорной, но и моторной модели. В случае моторной модели мозг контролирует корректность действия. Так, если при написании слова мы делаем ошибку (его визуальный образ не соответствует привычному — «что-то не так»), мы останавливаемся, чтобы перепроверить и исправить в случае необходимости.

Детекция изменений на уровне сенсорных систем получила свое подтверждение в экспериментальных работах с парадигмой ВП. Так, на основе многочисленных исследований (посредством слуховой стимуляции) был выделен ответ, получивший обозначение «негативность рассогласования». Этот электрический отклик возникает как ответ на различаемое изменение регулярности слуховой стимуляции (с латентностью пика 150–200 мс): в ряду повторяющихся стандартных слуховых стимулов редко предъясвляется девиантный. Негативность рассогласования — частный случай более общей операции по детекции изменений, которая происходит в разных модальностях. Этот феномен исключительным образом указывает на важную функцию нейронной активности сенсорных систем — фиксацию происходящих изменений. Наша осведомленность о внешних и внутренних объектах не сводится только к их восприятию как таковых. Нейроны, кодирующие конкретные свойства сенсорных объектов, формируют топографические организованные карты (например, по восприятию лица или звуков речи — слуховых образов слов). Любые изменения в текущей реальности активируют системы внимания на сознательном (селективное внимание) или бессознательном (автоматическое/рефлекторное внимание) уровне. Сохранение в памяти модели окружающей среды обеспечивает сравнение текущей картины с моделью, сформированной на основе предыдущей стимуляции. Каждая операция, протекающая на нейрональном уровне, соотносится с психологическими операциями. Операции сравнения и вовлечения (на психологическом уровне они соответствуют первичному восприятию зрительного или слухового стимула) генерируются структурами вентрального и дорсального путей обработки информации. Операции срав-

нения (детекция физических и слуховых изменений) в слуховой модальности отображаются как генерация негативности рассогласования (см. п. 2.4).

Нейрофизиологические закономерности работы сенсорных систем мозга, знание основных принципов восприятия позволяют эффективно наладить процессы обработки учебной информации и организовать учебный процесс в целом. В частности, на их основе могут быть сформулированы следующие рекомендации.

- Чем больше сенсорный опыт, тем активнее формируется внутренняя модель мира (антиципирующая система), которая лежит в основе когнитивной структуры, в свою очередь обеспечивающей развитие системы знаний.
- Стабильность, регулярность, привычность, неизменность окружающей действительности в течение длительного времени приводят к снижению активности сенсорных систем, поскольку последние реагируют прежде всего на нарушение стабильности, появление девиантного стимула. Соответственно, учитель должен обеспечить вариативность реальности в текущий момент, разнообразие стимуляции, модулирование зрительного потока, слухового потока (интонирование, смена темпа, паузы и т. д.). В этом плане монотонность — прямая угроза качеству восприятия учебной информации.
- Выделение различных характеристик объекта и изменение его месторасположения в пространстве способствуют переключению, для того чтобы воспринимать именно этот объект. Использование различных приемов (подчеркивание, выписывание, цветовое обозначение и т. д.) для выделения центральных понятий и действий (принцип «фон и фигура»), преобразование текста в таблицу, в графики, диаграммы, то есть смена форм и положения с целью активировать системы «что?» и «где?», будут способствовать активации процессов восприятия.
- Задействование различных анализаторов и всех сенсорных систем (слуховой, зрительной, моторной и других сенсорных систем) при обработке речевой и других видов информации повышает качество понимания.
- Необходимо обозначить место изучаемого явления, события или факта в общей системе данного предмета. При этом само рассмотрение может быть построено как от общего к частному, так и наоборот — от частного к общему, главное, чтобы сформировалось целостное представление о явлении (принцип целостности).
- Структурное представление учебного материала с разбиванием на блоки и вычленением основных положений (принцип структурности) облегчает восприятие.

- Ясность и четкость в подаче материала и формулировании понятий (принцип предметности) позволяют лучше выделять ключевые признаки воспринимаемого явления, облегчая понимание.
- Необходимо учитывать специфику осваиваемой учебной информации и формируемых навыков и умений, чтобы использовать оптимальные приемы активации нейрофизиологических механизмов зрительной и слуховой сенсорных систем.

## 3.2. Системы внимания

Великий русский педагог К. Д. Ушинский говорил о том, что «внимание есть та единственная дверь нашей души, через которую непременно проходит все, что есть в сознании. Если слово учителя минует эту дверь, то оно не войдет в душу ребенка» (цит. по: [Гамезо, Петрова, Орлова, 2003, с. 307]). Научить держать «эти двери» открытыми — особое искусство, которое обеспечивает успех всего учения. Только определенный уровень сосредоточенности (концентрации внимания) позволяет эффективно воспринимать, понимать и запоминать содержание учебного материала, аккуратно, точно и безошибочно выполнять учебную работу.

Ю. Д. Кропотков описывает внимание как «увеличение громкости» [Кропотков, 2010, с. 239] на физиологическом уровне: оно усиливает релевантную сенсорную информацию и подавляет несущественную для нас на данный момент времени. Эти селективные операции, или операции выбора, по сути, характеризуют процессы усиления/подавления нейронного представительства того или иного сенсорного стимула (источника информации) в процессах обработки информации. Таким образом обеспечивается более тщательная обработка сенсорной информации.

Необходимость выбора, которая в психологической терминологии может быть соотнесена с процессом фокусировки внимания, характеризует нашу способность избирательно ориентироваться в мире, где существует множество объектов разной сенсорной модальности, загромаждающих пространство. Обработать их одновременно невозможно, в связи с чем мы выхватываем из этого множества определенные объекты, которые оказывают более существенное воздействие на нашу систему восприятия в текущий момент, чем другие.

Процесс внимания включает операции трех типов:

- операцию вовлечения — усиление нейрональной реакции на источник информации, являющийся объектом внимания (может длиться довольно долго, позволяя удерживать внимание, например, при решении математической задачи или прослушивании музыки);



- операцию отвлечения — подавление источника информации, на который внимание не направлено (снижение вероятности того, что человек вернется к объекту, на котором внимание уже было сконцентрировано в предыдущий период);
- операцию перемещения — перемещение внимания между двумя источниками (от одного стимула к другому) при обработке двух разных источников информации.

Дополнительно выделяют подготовительную установку, характеризующую состояние готовности к появлению определенного стимула [Evarts, Shinoda, Wise, 1984] в сенсорной области.

Важно отметить, что на уровне моторных систем тоже выделяют операции выбора. Однако, в отличие от сенсорных систем, они связаны не с вниманием, а с исполнительными функциями. Этот факт подчеркивает различие между исполнительными и перцептивными функциями, которые реализуются разными нейронными механизмами. Селекция сенсорной информации обеспечивается за счет прямых и обратных связей разных кортикальных представительства сенсорных стимулов, в то время как при выборе действия ключевую роль играют базальные ганглии в составе таламо-кортикальной системы. Таким образом внимание вовлекает элементы именно сенсорной системы.

Краткое описание селективных операций, обеспечивающих внимание, позволяет понять, что его осуществление возможно, только если есть множество источников информации, которые конкурируют между собой. Это особенно заметно в классе, где учитель, являясь главным действующим лицом, должен быть максимальным «конкурентным стимулом» — источником стимуляции. Тем не менее внимание обучающихся часто перемещается на другие источники, если последние приобретают сравнительно большую значимость для них.

Борьба разных стимулов может быть прекращена двумя способами — за счет нисходящих и восходящих факторов влияния [Кропотов, 2010, с. 243]. Например, инструкция «смотреть только на красные буквы в тесте «Красно-черная таблица», игнорируя черные», инициирует процессы высшего порядка, которые управляют саккадическими движениями глаз. Прекращению борьбы может содействовать высокая отличимость стимула (например, треугольник на фоне множества кругов) по отношению к остальным (форма, цвет, размер, ориентация в пространстве), выступающая условием выраженности восходящих процессов. Именно взаимодействие нисходящих и восходящих влияний составляет сущность внимания. Кроме того, обработка сенсорной информации контролируется подкорковыми мозговыми структурами — таламусом и верхними бугорками четверохолмия. При предъявлении стимула, на котором сконцентрировано внимание, регистрируется увеличение активности нейронов подушки: верхние бугорки четверохолмия вовлекаются в генерацию саккадических движений глаз при произвольном поиске релевантных источ-

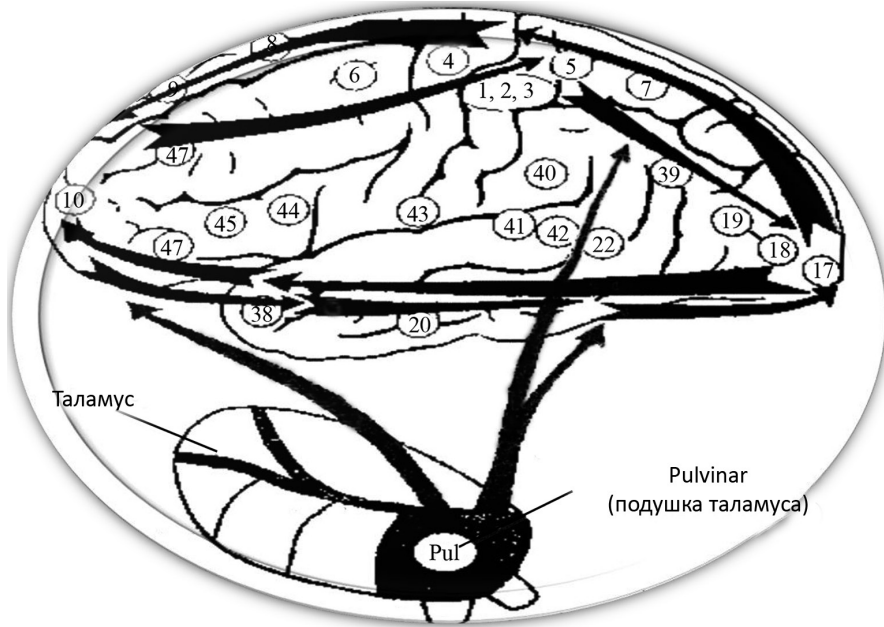


Рис. 3.2. Мозговые пути обеспечения внимания [Кропотов, 2010, с. 244]. Цифрами указаны поля Бродмана

ников информации. За счет реципроктных связей ядер подушки таламуса со структурами дорсального и вентрального путей обработки зрительной информации обеспечивается реализация функции внимания. Благодаря связям с областями префронтальной коры координируется работа исполнительных и сенсорных систем (рис. 3.2).

В зрительной модальности пространственное внимание и внимание, относящееся непосредственно к объекту, реализуются на уровне дорсального и вентрального путей обработки информации. Нейроны вентрального пути избирательно реагируют на атрибуты стимулов, важные для зрительного восприятия (текстуру, размер, форму, цвет и т. д.). Нейроны дорсального пути избирательно реагируют на пространственное положение (направление движения, скорость, динамику перемещения).

Одновременное предъявление двух стимулов в пределах одного рецептивного поля запускает механизм обработки в режиме взаимного подавления: оба стимула обрабатываются не независимо, а во взаимодействии друг с другом. При этом внимание тормозит подавляющий эффект стимула, находящегося вне фокуса внимания, в ответ усиливается активность стимула, на который оно направлено [Reynolds, Chelazzi, Desimone, 1999]. Таким образом, внимание разрешает проблему противоборства множества стимулов, уравнивая взаимное торможение восприятия разных источников информации посред-

ством более интенсивной обработки релевантных источников и ослабления обработки других.

Попытки изучить физиологический механизм внимания предпринимались на основе разных подходов. В частности, с помощью метода ВП был описан феномен «негативность выбора», где ВП — это показатель на уровне вентрального пути обработки зрительной информации. Например, этот компонент четко фиксируется на электроэнцефалограмме, если предъявлять поле с клетками двух цветов и просить испытуемого попеременно обращать внимание на клетки того или другого цвета. В этом случае ВП игнорируемого стимула будет проявляться как негативная компонента, то есть будет иметь место негативность выбора. На основе других исследований [Наатанен, 1998] было показано, что одновременное предъявление двух стимулов (как слуховых, так и зрительных) характеризуется появлением разностной негативности. Компонента ВП отражает разностный потенциал при сравнении целевого стимула, на котором концентрировалось внимание, и игнорируемого стимула. Кроме того, при сочетанном предъявлении стимулов концентрация внимания на одном стимуле при игнорировании второго приводит к увеличению общей активности. Система внимания тормозит подавляющий эффект стимула, находящегося вне фокуса внимания, тем самым усиливая активность восприятия стимула, на который оно направлено.

Очевидно, что работоспособность системы внимания существенным образом зависит от уровня общей активации. При низком уровне активации (например, в состоянии дремоты) пороги активации сенсорных нейронов чрезвычайно высоки и появление даже значимого целевого стимула слабо активизирует их. При гипервозбудимости пороги срабатывания сенсорных нейронов крайне низки, в связи с чем различные нерелевантные стимулы отвлекают внимание. Как в первом, так и во втором случаях работоспособность системы внимания крайне мала. В целом взаимосвязь работоспособности сенсорной системы как способности выделять конкретные стимулы на фоне шума и общего уровня активации полностью соответствует инвертированной U-образной взаимосвязи, в психологии раскрытой посредством закона Йоркса — Додсона.

Таким образом, для оптимальной работы системы внимания необходим оптимальный уровень возбуждения. Ключевым звеном системы неспецифической возбудимости являются ядра голубого пятна ствола мозга (часть ретикулярной формации — ядро, расположенное в стволе мозга на уровне моста). Изменение возбудимости в диапазоне от глубокого сна до гипервозбудимости строго коррелирует с общим уровнем активности нейронов голубого пятна.

Нейроны голубого пятна проявляют *тоническую, или фоновую, активность*, которая медленно изменяется вслед за медленными изменениями состояния мозга, и *фазическую активность* (быстрый ответ на временную сти-

муляцию, выполняющий функцию временного усилителя/фильтра). Именно фазическая компонента активности нейронов выполняет функцию временного усилителя, который интенсифицирует обработку наиболее значимых стимулов [Кропотов, 2010, с. 251].

С точки зрения образования ключевыми закономерностями работы системы внимания на уровне физиологии являются:

- зависимость ее работоспособности от уровня активации;
- одновременная обработка стимулов, которые находятся в отношениях взаимного подавления.

Первый аспект связан с пониманием того, что в ситуации контроля и оценки чрезмерное возбуждение однозначно приводит к снижению концентрации внимания. В результате чрезмерного возбуждения целевые стимулы могут выпасть из рецептивного поля, что обуславливает появление ошибок и неправильное выполнение задания. Такая ситуация характерна не только для ситуаций на экзамене, но и для выполнения сложных действий. Например, если школьнику с неустойчивым навыком письма нужно одновременно проявить навыки технического исполнения (написания) и применения правил (грамотность), у него, безусловно, возникает повышенное напряжение, а следовательно, гиперактивация, что неизбежно приводит к ошибкам и искажениям. Аналогичным образом возможна гиперактивация при сочетанном предъявлении множества условий или требований, которые нужно выполнять одновременно. Недостаточный уровень активации также приводит к низкой работоспособности системы внимания, так как способность сенсорной системы дискриминировать конкретные стимулы на фоне шума в таком состоянии крайне мала.

Второй аспект связан с объемом стимуляции в учебном процессе. Обилие стимулов может приводить к взаимному подавлению при их репрезентации в системе восприятия и провоцировать рассеивание внимания между разными источниками (операция перемещения). Поскольку, как уже было сказано ранее, внимание разрешает проблему конкуренции между многочисленными стимулами, уравнивая разные источники информации посредством торможения восприятия. В то же время бедность стимулов в рецептивном пространстве приводит к слабой конкуренции между стимулами — складывается ситуация, когда нет необходимости подавлять эффект стимула, находящегося вне зоны внимания, — тем самым снижает активность стимула, на который направлено внимание. Кроме того, обработка стимулов в режиме взаимного подавления требует, чтобы преподаватель поддерживал конкурирующие характеристики целевого стимула. Если мы хотим, чтобы целевой стимул был в фокусе нашего внимания, его атрибуты (форма, цвет, размер, расположение в пространстве и т. д.) должны иметь преимущества по сравнению с ирреле-

вантными стимулами. Это позволит усилить обработку информации от тех источников, на которых сконцентрировано внимание, и параллельно ослабить влияние других (механизм параллельного торможения).

Наиболее ярко присутствие стимула в поле нашего внимания фиксируется на основе компонент ВП, сгенерированных при предъявлении значимых стимулов и обозначенных как P300 (фиксируются в диапазоне от 250 до 400 мс). Так, компоненты P3a и P3b (см. табл. 2.1), принадлежащие к этой группе, четко регистрируются в ответ на мишени-стимулы. Компонента P3a проявляется в ситуации неожиданного изменения во внешней среде, когда обнаруживается новое событие и внимание переключается с целью более тщательно изучить это новое событие. И. П. Павлов (1925) называл возникающий рефлекс ориентировочным. В образовательном процессе ориентировочный рефлекс особенно ярко проявляется при смене деятельности или при появлении нового источника информации. Любое из этих событий требует изучения и, следовательно, переключения и активации.

Теменная компонента P3b определяется как компонента вовлечения и рассматривается в качестве результата активации групп нейронов, расположенных в теменных и лобных областях коры, при реализации явных или скрытых действий. Е. Дончин назвал этот процесс обновлением контекста [Donchin, 1981], описав его через обновление содержимого рабочей памяти вследствие появления любого целевого стимула.

На рис. 3.3 представлены скальповые ВП, зафиксированные в ответ на предъявление учебной информации<sup>1</sup>. Информация была представлена в виде либо схем, либо комиксов, либо текста. Зарегистрированные в лобных отведениях (Fp1 и Fp2) ВП показывают более высокую амплитуду в ответ на схему, что может быть интерпретировано как более высокая нейрональная активность в ответ на данный стимул на этапе ориентировки и включения механизма вовлечения.

На рис 3.4 представлен суммарный ответ ВП на предъявление учебной информации в виде текстов, схем или комиксов по отведениям Pz (теменное) и Fz (лобное). Более высокая амплитуда в ответ на стимул «комикс».

График с двумя пиками (справа) свидетельствует о различиях в том, как работает система внимания при обработке целевого стимула в виде схемы, текста или комикса. На графике справа видно, что при обработке схемы или текста ориентация сопровождается большей нейрональной активностью, что свидетельствует о быстрой ориентировке в ответ на предъявленный стимул. При обработке комикса наблюдается более поздний ответ в лобных отведениях, что может означать сложность в ориентации и необходимость обновления

<sup>1</sup> Результаты исследования получены Д. С. Гнедых в рамках гранта РГНФ (№ 14-06-00521 2014–2016 гг.) «Нейрофизиологические механизмы сложных видов умственной деятельности у студентов» под руководством С. Н. Костроминой.

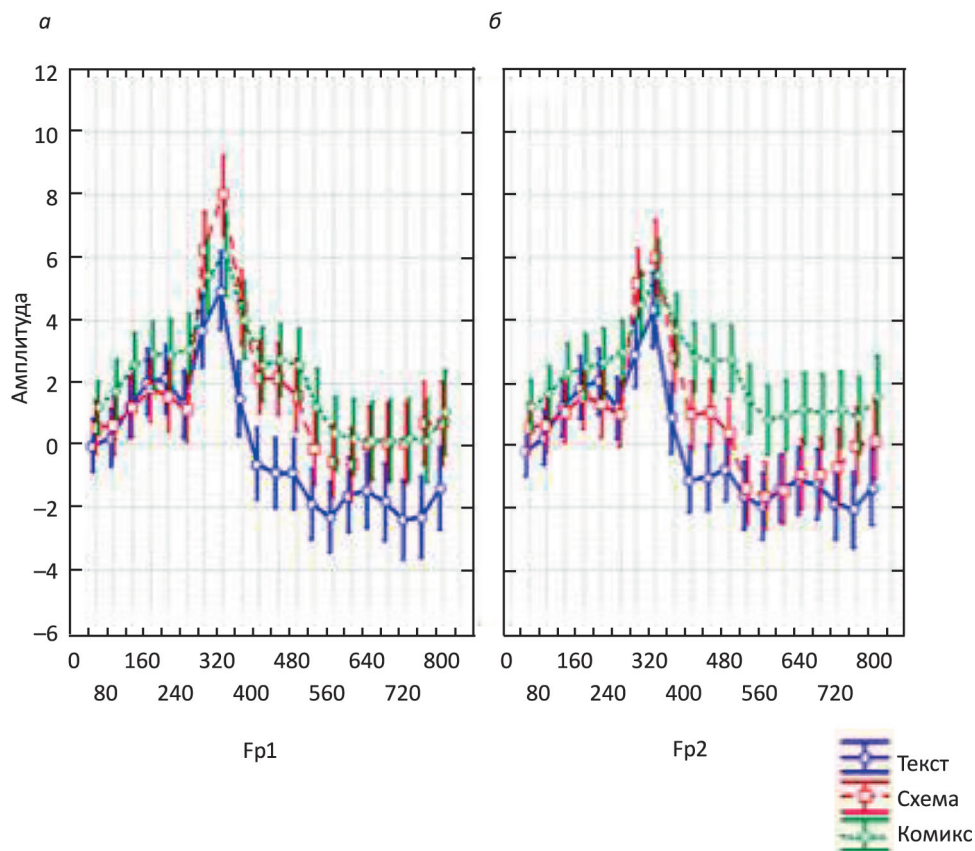


Рис. 3.3. Суммарный ВП в ответ на предъявление учебной информации в виде текстов, схем и комиксов по отведениям Fr1 (а) и Fr2 (б)

контекста. Эти же процессы фиксируются и на уровне теменных отведений. Более пологий график слева, описывающий ВП в ответ на предъявление комикса, характеризуется более длительной активацией систем внимания (от 250 до 450 мс) и большей концентрацией внимания. Такой вывод можно сделать, опираясь на тот факт, что в большинстве исследований синдрома нарушенного внимания присутствует снижение амплитуды компоненты P3b.

Приведенные данные нейрофизиологических исследований того, как работает система внимания, максимально указывают на взаимосвязь уровня активации и степени концентрации внимания, на специфичность стимулов при их обработке. В связи с этим мы можем сформулировать некоторые рекомендации, позволяющие преподавателю поддерживать активность системы внимания обучающихся на должном уровне:

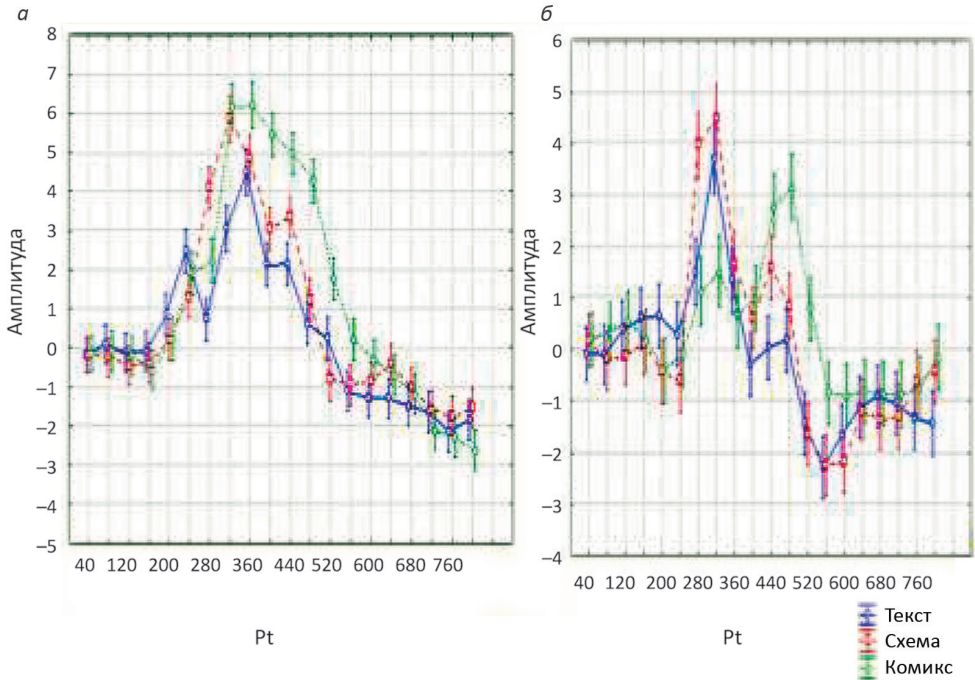


Рис. 3.4. Суммарный ответ ВП на предъявление учебной информации в виде текстов, схем или комиксов по отведениям:

а — Pz — центральное теменное отведение; б — Fz — центральное лобное отведение

- обеспечить качественную организацию занятия (отчетливая логика, приемлемый темп, соответствующая насыщенность информацией);
- сочетать задания на умственную деятельность с предъявлением наглядных материалов;
- синхронизировать подачу учебного материала с функционированием смысловых структур обучающихся;
- активизировать мыслительную деятельность учащихся;
- обеспечить контроль и оценку процесса и результатов усвоения;
- оптимально организовать восприятие учебного материала с учетом нейрофизиологических закономерностей работы сенсорных систем и системы внимания.

Процессы внимания тесно связаны с процессами памяти: чтобы удерживать репрезентацию объекта в памяти, необходимо внимание. И наоборот, внимание к определенным стимулам требует удержания в памяти ключевой информации о них. Работа компоненты РЗв наилучшим образом иллюстрирует эту взаимосвязь.

### 3.3. Системы памяти

Способность удерживать информацию в памяти развивается очень рано. Специально разработанные задания показали, что уже в возрасте от 9 до 12 месяцев младенцы способны обновлять содержание рабочей памяти [Cuevas, Bell, 2011]. Однако способность удерживать много объектов в памяти и осуществлять различные умственные манипуляции с ними (например, мысленно переставлять предметы в порядке увеличения их размера) развивается медленнее и значительно прогрессирует в процессе развития. В пожилом возрасте возможности рабочей памяти существенно снижаются.

Исследования рабочей памяти и ее роли в процессе обучения показывают, что ее недостаточное развитие влияет на успешность в обучении математике и родному языку в школьном возрасте [Gathercole, Brown, Pickering, 2003; Gathercole, Pickering, 2000a; 2000b; Gathercole, Pickering, Knight et al., 2004; Jarvis, Gathercole, 2003]. Исследования показали прямые взаимосвязи между возрастными интеллектуальными тестами и тестами на рабочую память в 7, 11 и 14 лет [Gathercole, Pickering, 2000a; 2000b; Gathercole, Pickering, Knight et al., 2004; Jarvis, Gathercole, 2003]. В целом большая часть выдающихся когнитивных достижений у детей дошкольного возраста связана с высоким уровнем развития именно рабочей памяти. Благодаря этому они могут феноменально запоминать и воспроизводить самые сложные названия и совершать многоуровневые вычислительные действия в уме, поражая взрослых своими способностями.

Традиционно в психологии классификация видов памяти основана на временной динамике следа (мгновенная, краткосрочная и долгосрочная (долговременная) память) и модальности следа (образная, двигательная, вербальная и другие виды памяти). Нейрофизиологические исследования мнемических процессов и научения позволили выделить виды памяти в соответствии с обеспечивающими их системами мозга (табл. 3.1), а именно эксплицитную (декларативную) и имплицитную (недекларативную).

Безусловно, все мнемические процессы обеспечиваются целым набором мозговых процессов и не могут быть сведены к одному или двум. Однако в данном случае речь идет о выделении структуры, которая играет ключевую роль в обеспечении конкретного вида памяти. В классификации декларативность определяет осознанность извлечения информации. Имплицитность подчеркивает преимущественно бессознательное протекание процессов памяти. Различия между эксплицитной и имплицитной памятью особенно ярко проявляются на примере речевой функции. Ее декларативная часть включает лексику (знание значений слов), хранение и использование которых обеспечиваются структурами теменно-височно-затылочного стыка. Имплицитная часть связана с грамматикой — процессами конструирования сложных предложений из лексических элементов по соответствующим правилам. Поддер-



жку этим процессам оказывают системы, включающие лобные и теменные области коры, базальные ганглии и структуры мозжечка.

Таблица 3.1. Нейрофизиологическое обеспечение памяти [Кропотов, 2010, с. 315]

Категория (подкатегория)	Содержание следов памяти	Структура мозга, отвечающая за формирование и хранение следов
<i>Декларативная</i> (эксплицитная, осознанное извлечение) <i>эпизодическая</i> (или автобиографическая)	События личной жизни, разворачивающиеся во времени, связи между событиями	Сенсорные области всех модальностей — гиппокамп — префронтальная кора
<i>Декларативная</i> (эксплицитная, осознанное извлечение) <i>семантическая</i>	Основные факты без всякой связи с личной жизнью (систематизированное и обобщенное знание субъекта о мире, о форме и значениях слов, символах, правилах, формулах, алгоритмах, возможности манипулирования символами, понятиями и отношениями)	Гиппокампсенсорные области всех модальностей — префронтальная кора
<i>Недекларативная</i> (имплицитная, преимущественно бессознательные процессы) <i>процедурная</i> (обеспечивает научение и вспоминание моторных и когнитивных навыков)	Высокоавтоматизированные сложные действия (например, речь или вождение автомобиля)	Префронтальная кора— базальные ганглии — система таламических связей
<i>Недекларативная</i> (имплицитная, преимущественно бессознательные процессы), <i>инструментальные</i> и условные рефлексy	Ассоциативная память при ответах на условный стимул. Безусловные ответы на стимулы положительного и отрицательного подкрепления	Сенсорные области всех модальностей, мозжечок, миндалина (амигдала)
<i>Недекларативная</i> (имплицитная, преимущественно бессознательные процессы), <i>прайминг</i>	Активация частей определенных репрезентаций или ассоциаций непосредственно перед осуществлением действия или выполнением задания	Краткосрочные модификации синаптической связи нейронов, обеспечивающих активацию репрезентации стимула
<i>Недекларативная</i> (имплицитная, преимущественно бессознательные процессы) <i>габитуация</i> (привыкание — постепенное уменьшение ответной реакции как результат продолжающейся или повторяющейся ситуации)	Неассоциативный след, формирующийся в результате снижения количества ответов при повторяющемся появлении стимула	Краткосрочная синаптическая депрессия

В соответствии с современными представлениями важную роль в обеспечении работы декларативной памяти играет медиальная височная кора, где функционирует сложная динамическая система мозговых процессов, поддерживающих функции кодирования, консолидации и извлечения недавно сохраненных следов. Хранение запоминаемого осуществляется на уровне височной, теменной и лобных областей. Извлечение реализуется при активном вовлечении гиппокампа, который «всякий раз обращается к хранилищу информации» [Кропотов, 2010, с. 317]. Постепенно следы памяти становятся независимыми от структур медиальной височной коры и находятся под влиянием структур неокортекса (поверхностного серого вещества, сложенного из шести слоев нейронов полушарий переднего мозга). Произвольное извлечение (попытка вспомнить) запомненной информации связано с активацией префронтальной коры, которая ранее получила в высокой степени обработанную сенсорную информацию, хранит планы действий и поддерживает реализацию исполнительных функций (рабочую память, выбор, инициацию и подавление действия). За счет нисходящих связей префронтальная кора инициирует активацию запомненной информации, связанную с конкретным действием.

Именно кодирование имеет особое значение для декларативной памяти, то есть для запоминания событий личной жизни и информации. Процессы кодирования связаны с увеличением нейронной активности в соответствующих сенсорных зонах (для визуализаций в области зрительной коры от шпорной до веретенообразной извилины), для слуховых стимулов — в височной коре (от извилины Гешли до височной извилины) и гиппокампе (для временного хранения запоминаемой информации). При этом сенсорная компонента события кодируется в височной и теменной коре, а компонента, связанная с действием, — в лобных долях.

Консолидация запоминаемого на уровне кортико-подкорковых связей осуществляется благодаря гиппокампу, обеспечивающему конвергенцию компонент в единый активационный паттерн — интеграцию информации. Образующийся след характеризуется долгосрочной потенциацией, индуцируемой на фоне всплесков тета-ритмов. Таким образом происходит консолидация (закрепление) следов памяти. Без участия гиппокампа следы памяти, относящиеся к конкретным событиям, могут храниться лишь непродолжительное время (за счет сохранения постактивности в нейронных сетях этих областей). Это связано с тем, что электрическая природа временного следа делает его чувствительным к различным помехам (именно чувствительность следа памяти является физиологической природой интерференции) и недолговременным. Гиппокамп инициирует долгосрочную потенциацию, поэтому его функционал отождествляют с временным хранилищем запомненной информации, которая в процессе когнитивной обработки субъектом консолидируется и становится знанием.

Исследования в области изучения нейрональных механизмов декларативной эксплицитной памяти демонстрируют существенную активацию сенсорных систем в ходе кодирования событий личной жизни и фактологической информации. Это обстоятельство дополнительно фокусирует внимание на необходимости максимального вовлечения сенсорных систем всех типов с целью обеспечить более эффективное запоминание учебной информации. Одновременно меньшее забывание (лучшее запоминание) «проявляется: 1) как усиление ответов на уровне гиппокампа; 2) увеличение когерентности между обонятельной корой (обладающей полимодальными связями с гиппокампом) и гиппокампом в гамма-диапазоне; 3) увеличение амплитуды тета-ритма» [Кропотов, 2010, с. 321]. Последнее обстоятельство — увеличение амплитуды тета-ритма — подчеркивает его важную роль в работе памяти. Его амплитуда свидетельствует о степени вовлеченности гиппокампа и, следовательно, о качестве текущего процесса запоминания, в том числе об усилении нагрузки на память. Кроме того, генерировать тета-ритм могут и структуры лимбической системы. Следовательно, эмоциональный контекст также существенно влияет на процессы запоминания. Чем он интенсивнее, тем выше генерация тета-ритма. Поэтому мы существенно лучше запоминаем эмоционально значимые события (положительные или отрицательные). Важное событие вызывает активацию гиппокампальных структур или структур лимбической системы, что проявляется в виде вспышки тета-ритма. Недостаточно важное событие не вызывает такой вспышки, и консолидации следа не происходит.

Процесс извлечения включает операции сходства (сличения) и воспоминания, которые обеспечиваются разными мозговыми механизмами. Первая операция подразумевает контекстуальное чувство сходства (похожесть, знакомство), вторая — детальное извлечение информации о событии прошлого. Различия между мозговыми механизмами частично объясняют, почему при проверке знаний итоги теста с закрытыми вопросами и ответы на открытые вопросы (без вариантов ответа) дают разные результаты. Наличие вариантов ответа запускает механизм сравнения (узнавания). Обучающийся выбирает тот ответ, который кажется ему более похожим на исходный вариант. В случае с открытым вопросом такое сличение невозможно, необходима актуализация всей «репрезентации события», извлечение затруднено. Если процессы кодирования и консолидации были поверхностными (единоразовыми) или неполноценными (например, не было времени для консолидации, «прочитал и пошел сдавать»), то результат оказывается редуцированным (извлеченная информация минимальна или искажена, потеряна в результате наложения вновь поступившей информации или не усвоена из-за продолжающегося процесса консолидации предыдущих следов).

Извлечение изображений из памяти сопровождается активацией в области веретенообразной извилины. Воспоминание звуков характеризуется била-

теральной активацией височной извилины вблизи вторичных областей слуховой коры. Важно, что процессы извлечения информации из декларативной памяти обуславливают упорядочивание соответствующих структур памяти, в результате формируются долгосрочные нейронные связи, информация переводится в долгосрочную память. При эксплицитном воспроизведении (произвольном вспоминании требуемой информации, например при контроле, проверке, выполнении теста или на экзамене) или вспоминании во сне следы в гиппокампе активируются, следы памяти на уровне коры восстанавливаются и взаимодействие зон коры возрастает. Более того, процессы извлечения упорядочивают соответствующие структуры памяти, в результате структурируются нейронные связи и формируются долгосрочные нейронные сети. В этом процессе гиппокамп выступает в роли центрального звена, обеспечивающего многократное обновление репрезентаций события на уровне корковых связей, пока они не станут независимыми и консолидированными (прочными). Временная актуализация следа (воспроизведение события) в гиппокампе снижает чувствительность к помехам, поскольку следы отдельных событий картируются в разных частях гиппокампа. Бессознательное извлечение следов памяти также возможно и происходит во сне, имеет сходный механизм, как и сознательное извлечение, целенаправленное вспоминание.

Нейрональные механизмы эксплицитной памяти объясняют традиционные принципы обучения: «повторение — мать учения», «новое — хорошо забытое старое», «усложнение по спирали — возвращение к изученному на новом, более сложном уровне». Каждый из них апеллирует к необходимости извлечения изученного материала и многократному повторению. Аналогичным образом «работает» и пересказ изученного. В традиционном понимании «выучить материал» означает его воспроизведение, в том числе и самому себе. Написание шпаргалок есть не что иное, как письменный структурированный пересказ учебной информации в сжатой форме, иногда в виде трансформации текста в графические формы. Каждое из этих действий связано с многократным кодированием, консолидацией и извлечением, что приводит к активации, способствует структурированию и переструктурированию нейронных связей, обновлению репрезентации события, позволяя информации консолидироваться и дольше сохраняться в памяти.

Процедурная память, имплицитная по своей сути, обеспечивает научение и вспоминание моторных и когнитивных навыков, в том числе учебных умений и действий разного уровня обобщения. К сенсомоторным действиям относятся, например, езда на велосипеде или коньках, игра на музыкальных инструментах, письмо и печатание, к сложным когнитивным навыкам — планирование и когнитивный контроль. Функциями процедурной памяти выступают координация и запоминание сложной последовательности действий, которые состояются из освоенных ранее более простых операций.

Если для декларативной памяти существенное значение имеет репрезентация событий, то для процедурной памяти — карта действий. «В отличие от эпизодической памяти, системе процедурной памяти не требуется наличие отдельных систем кодирования и консолидации события» [Кропотов, 2010, с. 323]. Формирование карты действий обеспечивают исполнительные системы во взаимодействии с мозжечком и структурами базальных ганглиев, где ключевую роль играет стриатум. Механизм формирования карты подразумевает перестройку старой карты действий, что может быть описано как медленное изменение системы синаптических связей исполнительной системы. Вовлечение исполнительных систем и базальных ганглиев обеспечивает сенсомоторное сопряжение, моторное планирование, организацию последовательных действий, подкрепленных обучением, и реализацию множества моторных программ. В этой системе функциональная задача мозжечка состоит в координации сложных бессознательных и мысленных движений рук, расчете времени и координации последовательности действий (подробнее см. раздел 3.4).

Запоминание процедуры (последовательности) действий — процесс гораздо более длительный в отличие от быстрого кодирования эксплицитной (декларативной) информации, поскольку требует множества ассоциативных связей между контекстом и осваиваемым действием. В этом плане овладение знанием и действием подразумевает, что не только разные механизмы будут задействованы, но временные затраты будут отличаться. Процесс научения действию протекает постепенно и требует множественного повторения и ассоциаций, то есть занимает гораздо больше времени. Чтобы это понять, достаточно сравнить, сколько времени потрачено при обучении элементарным действиям в игре в теннис и при запоминании эпизода теннисного матча. Зато извлечение информации имеет обратную зависимость: сознательное извлечение информации о событии в зависимости от типа сенсорной информации занимает несколько сотен миллисекунд, в то время как из процедурной памяти программа действий извлекается быстрее и, возможно, автоматически (без контроля сознания). Доказательством того, что извлечение из процедурной памяти происходит быстрее, чем из эпизодической, служат ВП, характеризующие моторный ответ, в сравнении с процессами сознательного вспоминания. Результат сознательного вспоминания отображается посредством операции вовлечения (компонента P3b), появляющейся в ответ на стимул примерно через 300–500 мс, в то время как компонента P2, регистрируемая как моторный ответ на Go-стимул (см. раздел 2.4) (отражает процесс вспоминания на уровне процедурной памяти), имеет пиковую латентность ВП (максимальную амплитуду в ответ на стимул) от 150 до 275 мс.

К имплицитной памяти относятся феномены прайминга и габитуации. Прайминг (от англ. *to prime* — инструктировать заранее, давать предшествующую

щую установку и т. п.) — явление имплицитной памяти, которое представляет собой:

- изменение скорости или точности решения задачи (перцептивной, мыслительной или мнемической), наблюдаемое после предъявления информации, связанной с содержанием или с контекстом данной задачи, но не соотносящейся напрямую с ее целью и требованиями;
- повышение вероятности спонтанного воспроизведения этой информации в подходящих условиях.

Прайминг характеризует процесс первичной обработки информации при восприятии в ситуации имплицитной (непреднамеренной) подготовленности, когда сохраняется контекст (информация), который способствует облегчению восприятия и неконтролируемому воспроизведению информации из прошлого. В результате улучшается идентификация стимулов после их предварительной презентации. Например, объект, который человек видел ранее (даже не отдавая себе в этом отчет), идентифицируется быстрее и точнее, чем новый. Это объясняет, почему любая информация по новой теме будет восприниматься и запоминаться легче, если преподаватель актуализировал некий сопутствующий ей контекст из прошлого опыта обучающихся (из ранее изученного). Предполагается, что прайминг обеспечивается активностью задних кортикальных областей, которые специализируются на перцептивных операциях. Данное обстоятельство позволяет предположить, что перед предъявлением новой информации предварительный визуальный контекст, который тем или иным образом будет связан с ней контекстуально, создаст условия, когда тема не будет восприниматься как совершенно новая (непроизвольно активирован сопутствующий опыт, ассоциации) и неструктурированная, вероятность акцентирования внимания на деталях будет выше. Независимо от намерений человека прайминг может повлиять на решение задачи, усвоение информации как положительно, так и отрицательно, что служит дополнительным аргументом, чтобы отнести его к классу непроизвольных и неосознаваемых влияний.

Габитуация (привыкание) отражает эффект негативного неассоциативного научения, состоящего в отсутствии реакции на определенный стимул. В плане нейрофизиологии при воздействии стимула активность нейронов сохраняется в течение определенного времени. Если действие стимула продолжается, то одни и те же синапсы мозга, куда поступает возбуждение, задействуются многократно, и в результате эффективность их деятельности постепенно повышается. Однако длительное воздействие одного и того же раздражителя (например, тикание часов) может приводить к тому, что количество синаптических связей между сенсорными и моторными нейронами уменьшается примерно на 1/3, одновременно уменьшается число активных зон в синапсах. Таков

структурный компонент снижения физиологической активности нейронной сети и уменьшения проявления ее реакции на действие стимула, что снижает продуктивность запоминания. Для обучения важно, что любые монотонные, часто повторяющиеся стимуляции не только рассеивают внимание, но и снижают качество запоминания учебной информации.

Сохранение в памяти полученной и переработанной с помощью мышления информации является важной задачей процесса обучения. Необходимо, чтобы учащийся мог не только воспроизвести осмысленную информацию, но и применять ее в учебной деятельности. Для того чтобы правильно организовать закрепление учебного материала в памяти, нужно учитывать нейрофизиологические закономерности протекания мнемических процессов (запоминания, сохранения, воспроизведения, узнавания и забывания), индивидуальные особенности памяти и приемы рационального запоминания. Сохранению информации в основном способствует активная деятельность по многократному извлечению, которое включает структурирование, неоднократную репрезентацию (реконструирование) и переструктурирование информации, например посредством работы с текстом, подбора соответствующих примеров или составления задач.

Дополнительные условия запоминания и сохранения информации:

- учет особенностей работы кратковременной памяти ( $7 \pm 2$ , или, с учетом нейрофизиологических исследований,  $5 \pm 2$  единицы информации, установка на срок и характер запоминания и т. д.);
- организация переработки материала на разном уровне (многоуровневое кодирование):
  - ✓ 1-й уровень — повторение,
  - ✓ 2-й уровень — включение в общую схему,
  - ✓ 3-й уровень — сравнение с другими вариантами;
- использование ассоциативных связей и опора на визуализацию (опора не только на словесно-логическую память, но и на эмоциональную, образную и двигательную);
- составление мнемосхем (укрупнение материала, комбинирование элементов информации в осмысленные блоки);
- «профилактика» забывания посредством противодействия угасанию информации, искажению, интерференции и сбою ключевых признаков (табл. 3.2).

Кроме того, можно использовать мнемические приемы:

- изменение информации (перефразирование);
- дополнение информации;

- организацию материала (группировку по разным основаниям, установление связей между элементами информации, выделение общих идей или понятий, структурное преобразование текста);
- установление ассоциативных связей (например, подкрепление фактом, поражающим воображение).

Таблица 3.2. Организация эффективного запоминания в учебном процессе

Проблема сохранения учебной информации в памяти	Средство для преодоления проблемы
Угасание	Обеспечение возможности повторения и репетиции
Искажение	Подчеркивание наиболее важных и характерных черт изучаемого материала)
Интерференция (проактивная и ретроактивная)	Перенос знаний на различные ситуации. Подчеркивание сходств и отличий
Сбой ключевых признаков	Выделение отношений и связей, которые могли бы выступать в качестве ключевых признаков и по которым можно было бы извлечь информацию. Обучение разнообразным мнемическим приемам

### 3.4. Исполнительные функции и универсальные учебные действия

Процесс учения является не простым накоплением знаний, умений и навыков, а особым видом деятельности со своими целями, структурой и средствами достижения. Учение — активный процесс, в результате которого формируются специфические для данного вида деятельности умения и знания о том, как необходимо учиться, чтобы усвоение происходило максимально полно, а учебный процесс шел максимально эффективно (приобретались мета-знания).

В человеке естественным образом заложена способность обучаться (это показали теории бихевиоризма и социально-когнитивного научения), которая состоит в природной склонности к обобщениям. Когда человек оказывается вовлеченным в атмосферу познания, в систему особого рода учебных заданий и упражнений, у него формируются знания и умения, специфичные для учебной деятельности. Выполняя задания, человек начинает осознавать многочисленные и разнообразные стратегии и учебные действия, выбирать наиболее оптимальные из них для определенного вида заданий. Это позволяет ему стать опытным учащимся, который привык к учебной деятельности.



Учебная деятельность включает в себя:

- овладение системами знаний и оперирование ими;
- овладение системами обобщенных и более частных действий, приемов (способов) учебной работы, путями их переноса и нахождения — учебными умениями и навыками;
- развитие мотивов учения, становление мотивации и смысла последнего;
- овладение способами управления своей учебной деятельностью и своими психическими процессами (волей, эмоциями и пр.).

На протяжении более чем 50 лет теория учебной деятельности остается одной из наиболее востребованных концепций в системе образования. Разработана четкая структура учебной деятельности, раскрывающая психологические механизмы и этапы того, как научить человека учиться, то есть открыть ему путь к самообразованию, саморазвитию и самосовершенствованию. На практике тезис «научиться учиться» означает необходимость сформировать у учеников самостоятельность в учебной деятельности. Описание структуры и генезиса овладения учебной деятельностью позволяет ответить на вопрос, как это сделать. «Формирование учебной деятельности есть процесс постепенной передачи выполнения отдельных элементов этой деятельности самому ученику для самостоятельного выполнения без вмешательства учителя» [Эльконин, 1974, с. 49].

### **3.4.1. Метакогнитивный аспект обучения: универсальные учебные действия**

Авторы теории учебной деятельности Д. Б. Эльконин и В. В. Давыдов представляли учебную деятельность как систему учебных действий, необходимых для достижения учебной цели или решения учебных задач [Эльконин, 1974; Давыдов, 1986]. Структурными компонентами учебной деятельности являются: учебная задача, учебные действия (действия, необходимые для выполнения учебной задачи), контроль (самоконтроль результата) и оценка (самооценка усвоения). Учение должно рассматриваться в единстве ее компонентов, как целостная учебная деятельность [Давыдов, Маркова, 1981, с. 19]. Процесс решения учебной задачи связывает воедино мотивацию учебной деятельности (хочу решить, понимаю зачем), ее операциональный компонент (что делать и как делать?) и эмоциональное отношение к получаемому результату — элемент собственного преобразования, самоизменения (должен и смогу решить). Такое понимание четко разграничивает психологическое содержание учебной деятельности и расширительное толкование учения, которое относится к любой учебной работе школьника. Без включенности в решение учебных задач

и выполнения учебных действий (овладения обобщенными способами решения учебных задач) учебная активность школьников деформируется, а усвоение знаний превращается в оперирование житейскими представлениями при использовании утилитарных навыков.

Соответственно, основу собирательного понятия «умение учиться» составляют развитые способности понимать и принимать цели и задачи учебной деятельности, находить недостающие знания и осваивать недостающие умения, а также активно использовать различные способы решения учебной задачи (сбор информации, обработку, анализ, интерпретацию информации, обобщение и т. д.) [Цукерман, 1992]. Полноценное управление процессом учения предполагает отработку каждого компонента учебной деятельности школьником, освоение их взаимосвязи и постепенное самостоятельное выполнение без участия взрослого (учителя). Становление и полноценное овладение учебной деятельностью происходят на основе постоянного совершенствования каждого компонента, постепенного превращения ученика в субъекта учения.

**Понимание и принятие учебной задачи (что нужно сделать?), ее самостоятельная постановка.** Согласно Д. Б. Эльконину [1961], учебная задача предполагает создание учебной проблемной ситуации. Проблемная ситуация — необходимая составляющая для возникновения учебной задачи. Проблемная ситуация предполагает ситуацию неизвестности, непонятности, что стимулирует действия субъекта (мыслительные, практические и т. д.). И в тот момент, когда включается процесс мышления, проблемная ситуация перерастает в задачу. Задача возникает как следствие проблемной ситуации, в результате ее анализа. Поставить перед учащимися учебную задачу — значит ввести их в проблемную ситуацию. Соответственно, в ходе учебной деятельности необходимо предъявлять обучающимся ряд учебных задач, которые предполагают решение посредством учебных действий.

У В. В. Давыдова содержание учебной задачи определяется необходимостью овладеть системой научных понятий, теоретическим обобщением. Формирование основных понятий учебного предмета в процессе того, как учащиеся решают учебную задачу, должно строиться как движение по спирали — от центра к периферии. В центре находится абстрактно-общее представление о формируемом понятии, а на периферии это общее представление конкретизируется, обогащается частными представлениями и тем самым превращается в научно-теоретическое понятие [Давыдов, 1986]. Такое структурирование учебного материала принципиально отличается от традиционного линейного (индуктивного) способа работы с учебным содержанием, когда процесс обучения выстраивается от рассмотрения частных фактов и явлений к их эмпирическому обобщению на завершающем этапе изучения того или иного понятия. Формирование обобщающих представлений о понятии на завершающем этапе обуславливает ограниченность понятия в системе знаний ученика. Оно не по-

могает и не направляет в изучении частных случаев и близких понятий, в связи с чем на следующих этапах обучения его сложно развивать и обогащать. Введение фундаментального понятия на начальном этапе изучения позволяет в дальнейшем обогащать это абстрактно-общее представление и конкретизировать частными фактами и знаниями. Оно служит ориентиром в течение всего процесса изучения, однозначно включается в иерархическую понятийную систему и помогает осмыслить все вводимые в дальнейшем частные понятия с точки зрения уже имеющегося общего представления.

**Система учебных действий.** Специфика учебной задачи состоит в том, что при ее решении учащиеся посредством учебных действий открывают для себя общий способ (принцип) решения целого класса частных задач и овладевают им. Поэтому формирование и развитие системы учебных действий предполагают овладение обобщенными способами действий (то есть отвечают на вопросы: как решить? как сделать?) с целью решить учебные задачи разнообразных типов. В обобщенном виде способы действий описывают последовательность достижения целей учебной деятельности: формирование представления или предварительного образа усваиваемого действия через воспроизведение образца; планирование «шагов» (этапов), для того чтобы решить учебную задачу [Эльконин, 1989, с.269]. В качестве основных Д. Б. Эльконин выделяет учебные действия целеполагания, программирования и планирования. По мнению В. В. Давыдова [1986], ключевыми учебными действиями, позволяющими успешно решать учебные задачи и усваивать содержание учебных дисциплин, являются содержательное (то есть теоретическое, на основе выделения существенных признаков) планирование, анализ и рефлексия.

Учебные действия состоят из учебных операций, в связи с чем эти действия выступают операторным содержанием учебных задач [Эльконин, 1989, с. 275]. В каждом учебном действии можно выделить операциональную основу. Например, выполнение преобразования условий учебной задачи и моделирования требует содержательного анализа. Реализация учебного действия, направленного на построение системы задач на основе общего способа их решения, предполагает содержательное планирование. При этом практически каждое учебное действие сопровождается рефлексией. Благодаря рефлексии субъект «рассматривает основания своих собственных мыслительных действий» [Давыдов, 1986, с. 69].

Технологически формирование операциональной основы учебной деятельности и системы учебных действий связано с постоянным решением задач определенного класса с опорой на ориентировочную основу второго (дана в готовом виде полная система ориентиров, алгоритм) и третьего (полная система ориентиров составляется самостоятельно на основе общего метода) типов по П. Я. Гальперину. Согласно Д. Б. Эльконину, каждый раз при решении учебной задачи ученик должен формулировать цель своей деятельности (Что

я буду сейчас делать?) и четко представлять последовательность своих действий (Как я буду это делать?). Проблематизация учебной задачи будет подталкивать ученика к поиску новых способов решения или осознанию недостающих условий, знаний или умений, тем самым инициировать применение тех способов, которые ученик усвоил, но с переносом в новую учебную ситуацию, либо к овладению (самостоятельно или с помощью взрослого) новым обобщенным способом решения. В ходе совместной учебной деятельности возможно обсуждение лучшего способа решения, обмен мнениями и помощь другому найти более эффективную последовательность действий. Таким образом, расширяется и обогащается операциональный репертуар учебной деятельности, развивается индивидуальная система учебных действий.

Успешное овладение учебной деятельностью возможно только при соблюдении ряда условий:

- объектом усвоения должны быть теоретические понятия, поскольку только в этом случае происходит выделение существенных признаков, составляющих основу понятия, и их обобщение;
- процесс усвоения должен протекать так, чтобы перед обучающимися раскрывались условия происхождения понятий, а условия обучения создавали возможность анализа частного явления и выделения его существенных признаков;
- результатом усвоения должно быть формирование не только знаний, умений и навыков, но и специфических учебных действий, отражающих динамику становления учащегося как субъекта учения (в этом случае объектом учебной деятельности является формирование обобщенных моделей решения учебных задач) [Давыдов, Маркова, 1981, с. 21].

Учет представленных условий в учебном процессе способствует тому, что ученик осознает себя как мыслителя, как субъекта, перерабатывающего информацию. Содержательное подкрепление обеспечивают разнообразные задания: определение цели и задач выполнения учебной работы, осознание смысла совершаемого учебного действия, нахождение взаимосвязей между разными тематическими блоками (учебными модулями), обучение другого, оценка эффективности учебной деятельности, контроль и самоконтроль усвоения.

Наиболее полно, по мнению В. В. Давыдова [1986], указанным условиям соответствует экспериментирование. Лучше, чем какой-либо другой способ, экспериментирование позволяет открывать и анализировать свойства объекта, устанавливать существенные связи между ними, исследовать исходную форму объекта, то есть проводить теоретическое (содержательное) обобщение. Стоит заметить, что традиционная наглядность основана на эмпирическом обобщении, базирующемся на наблюдении и сравнении внешних свойств

предметов. Эмпирическое обобщение формирует эмпирическое мышление: дети овладевают лишь отдельными приемами решения конкретных практических задач на основе суммы частных знаний. При изучении крупного раздела того или иного предмета учитель демонстрирует учащимся необходимость овладеть именно обобщенным способом ориентации, обобщенным способом решать задачи достаточно обширных классов. В результате экспериментирования выделяются наиболее существенные признаки и связи объекта, которые способствуют построению обобщенной теоретической основы решения и развитию теоретического мышления. Благодаря этому школьники постепенно приучаются искать общий принцип решения проблемы, обращаться к различным источникам информации для выявления этого принципа, заниматься самообразованием и применять полученные навыки при решении частных задач. Таким образом, на основе развития системы учебных действий достигается цель учебной деятельности — становление субъекта учения, способного самостоятельно регулировать свою познавательную деятельность в дальнейшем. Учебную деятельность также поддерживают другие виды деятельности, способствующие организации процесса познания и эффективному усвоению учебного содержания: творческая, контекстная (имитационная), научно-исследовательская, экспериментальная, игровая, поисковая, диалогическая (совместная).

**Контроль.** Для того чтобы установить правильность учебных действий, необходимо соотнести ход их выполнения с заданным образцом, то есть осуществить контроль. Особое значение придается тому, как ученик выполняет действия контроля. Овладение этим действием «характеризует всю учебную деятельность как управляемый самим ребенком произвольный процесс» [Эльконин, 1989, с. 218]. Благодаря самостоятельному контролю учебной деятельности обеспечивается соответствие учебных действий требованиям учебной задачи [Давыдов, 1986, с. 69]. Д. Б. Эльконин считал контроль тем действием, с которого надо начинать формировать учебную самостоятельность. «Есть основание думать, что рациональнее всего начинать с формирования самостоятельного контроля. Дети прежде всего должны научиться контролировать друг друга и самих себя» [Эльконин, 1974, с. 49].

Безусловно, на первых этапах контроль за выполнением учебных действий берет на себя взрослый (учитель). Однако постепенно, по мере освоения операциональной основы, школьники начинают самостоятельно соотносить результаты своих действий с заданной или самостоятельно сформулированной целью (образом результата), находить несоответствия и причины их появления, корректировать результат (устранять несоответствия), изменяют учебные действия и переходят к полноценному самоконтролю учебной деятельности. В зависимости от того, какая ориентировочная основа для совершения контролируемых действий будет предложена, школьник освоит соответствующий

обобщенный способ контроля. Фактически речь идет о введении и постоянном использовании ситуации контроля как особого типа учебной задачи.

**Оценка.** Ребенку предстоит научиться определять, насколько он усвоил способ решения учебной задачи, насколько результат учебных действий соответствует их конечной цели, а также тех изменений, которые произошли в нем самом [Эльконин, 1989, с. 294]. Таким образом учащийся получает обратную связь об эффективности собственной учебной деятельности. Оценка своих действий формируется постепенно. На основе усвоения образцов учебных действий, критериев оценки учителя, специально сформулированных учебных задач, цель которых — самостоятельно оценить правильность выполнения задания, происходит переход от оценивания работы учителем к самооцениванию. Этот переход также требует усвоения обобщенного способа действий, то есть ориентировочной основы действия оценки, которая будет содержать опорные признаки. Например, сделал сам или с чьей-то помощью, сделал полностью или частично, сделал безошибочно или с ошибками (исправлениями), сколько сделал ошибок и т. д.

\* \* \*

Содержание и компоненты учебных действий обусловлены генеральными характеристиками учебной деятельности: обязательностью, результативностью и произвольностью. Выполнение каких бы то ни было учебных работ направлено на получение конкретного результата, который часто дается в виде образца или модели, предполагает действие по определенной программе, алгоритму, подразумевает контроль за качеством полученного результата, проверку на соответствие заданным правилам и требует подчинения своих действий условиям учебной ситуации, управления своим поведением. Усложнение системы учебных заданий определяет расширение и углубление комплекса учебных действий, необходимых для их выполнения. Со временем вовлеченность в учебный процесс приводит к тому, что обучающийся осознаёт себя как мыслителя, как субъекта учебной деятельности, способного управлять переработкой информации. Индикатором становления субъекта учебной деятельности можно считать проявление творчества при усвоении учебного содержания через практическое применение приемов и подходов, обеспечивающих критичное и эффективное учение, определение целей и задач учебного задания, понимание смысла и личностной значимости совершаемых учебных действий, расширение и получение дополнительных знаний и умений, необходимых для оптимальной организации учения.

Важно отметить, что формирование учебной деятельности имеет возрастную специфику. На начальном этапе обучения (6–8 лет) главной задачей является включение ребенка в учебную работу, учитель помогает ребенку найти новые способы действий для принципиально других задач, нежели в до-

школьном обучении. По мере освоения отдельных учебных действий необходимо включить младшего школьника (8–11 лет) в учебное взаимодействие с одноклассниками и учителем. В этот период учебные действия объединяются в целостный акт учебной деятельности, происходит становление смыслообразующей функции познавательного мотива. Школьник нацеливается на решение новой задачи, проявляет желание решить задачу новыми способами, расширить объем своих знаний, умений, навыков, то есть начинает проявлять инициативу в самообучении. Как указывают В. В. Давыдов, В. И. Слободчиков и Г. А. Цукерман [1992], в младшем школьном возрасте важно овладеть рефлексивными и поисковыми действиями. В 6–9-м классах (12–15 лет) усложняется содержание учебной деятельности: предметом усвоения становятся целостные системы теоретических понятий, излагаемые абстрактным языком с использованием графиков, таблиц, моделей. Учащиеся должны постепенно приступать к самостоятельной постановке учебных задач и самостоятельной оценке своих решений. Вместе с тем важно научиться коллективно решать задачи. Учебная деятельность напоминает диалог, обсуждение учебного материала и результатов становится дискуссией, когда каждый участник может внести коррективы в то, как предлагается понимать учебную задачу, и способы ее решения. Усложнение учебных задач, внедрение проектов и многозадачный контекст учебной деятельности способствуют тому, что в старших классах и в вузе разные учебные действия и алгоритмы, которые школьник усвоил или выработал, образуют взаимосвязи и формируют устойчивые сочетания (комплексы) действий, автоматически включающиеся при выполнении учебных задач различных типов. Такие комплексы учебных действий, целенаправленно организуемые субъектом, принято обозначать как учебные стратегии [Костромина, Дворникова, 2007]. Они отражают специфику усвоения учебного содержания и индивидуальный стиль учебной деятельности, составляя операциональный репертуар опытного учащегося.

Из описания структуры и генезиса учебной деятельности становится понятным, что ее систематическое осуществление способствует интенсивному развитию теоретического мышления, включая содержательные абстракции, обобщения, анализ, целеполагание, планирование (внутренний план действий) и рефлексивность.

На основе психологической теории учебной деятельности А. Г. Асмолов, Г. В. Бурменская, И. А. Володарская и др. разработали концепцию развития универсальных учебных действий. Для достижения учащимися умения учиться необходимо полноценное освоение «всех компонентов учебной деятельности, включая: 1) познавательные и учебные мотивы; 2) учебную цель; 3) учебную задачу; 4) учебные действия и операции (ориентировка, преобразование материала, контроль и оценка)» [Асмолов, Бурменская, Володарская и др., 2008]. Контроль (сопоставление способа действия и его результата с заданным

эталоном с целью обнаружить отклонения и отличия) относится к регулятивным универсальным учебным действиям, обеспечивающим самоорганизацию учебной деятельности.

Универсальные учебные действия принадлежат к группе метакогнитивных процессов, обеспечивающих познание, стоящих «над» когнитивным функционированием, подразумевающих переработку информации, ее усвоение. В теории учебной деятельности предлагается рассматривать учебные действия как инвариантную основу познания, создающую условия для самостоятельного успешного усвоения новых знаний, умений и компетенций, включая организацию учения. Как универсальная система она позволяет описать весь процесс учебной деятельности — от получения и преобразования новой информации до ее регуляции (целеобразования, планирования, контроля, оценки, прогнозирования), тем самым выделить критерии оценки степени сформированности учебных действий и разработать задания для их развития.

Формирование системы универсальных учебных действия является самым значимым результатом (итогом) овладения учебной деятельностью. Степень успешности школьника определяется его способностью к самостоятельной учебной работе, то есть к целенаправленной, внутренне мотивированной деятельности, которую он сам структурирует и корректирует, ориентируясь на процесс и результат учебной деятельности. Научившийся учиться школьник может самостоятельно решать различные познавательные и практические задачи. Он способен сам поставить себе цель, выбрать вид работы для ее достижения, подготовить рабочее место, разработать алгоритм выполнения, реализовать его без непосредственного участия взрослого (наставника), систематически следить за ходом и результатом выполняемой работы, корректировать и совершенствовать ее. В этом смысле учебная деятельность обладает огромным дидактическим потенциалом, поскольку в ходе нее школьник усваивает и расширяет учебный материал, научается работать с различной информацией, развивает аналитические способности, приобретает навыки контроля и планирования учебного времени, формирует интерес к познавательной деятельности, овладевает приемами процесса познания, развивает познавательные способности.

### **3.4.2. Исполнительные функции как нейрофизиологическая основа учебной деятельности**

С точки зрения нейрофизиологии, ключевым элементом учебной деятельности как самоорганизационной системы выступает способность к управлению познавательной деятельностью. Нейрофизиологический подход основан на трактовке всех процессов приема, хранения и обработки информации, ре-



гуляции деятельности как автоматизмов, существующих и подчиняющихся нейрофизиологическим законам функциональной активности мозга при решении сложных когнитивных задач и работе исполнительных систем мозга.

Имеющиеся данные в области нейробиологии свидетельствуют, что когнитивные и метакогнитивные функции не являются генеральной способностью — жестко организованной системой. Существует предположение, что причиной трудностей планирования или решения сложных задач при сохранном интеллекте выступает слабость «связанных функций, сходящихся при планировании или программировании будущих действий, при проведении этих планов или программ на линии, до их выполнения или торможения» [Pennington, Ozonoff, 1996, p. 5]. Решение сложной когнитивной задачи — это единство и многообразие исполнительских функций. Часто они развиваются независимо друг от друга и слабо связаны [Miyake, Friedman, Emerson et al., 2000]. До сих пор исследования, подтверждающие предположение, что компоненты системы, реализующей сложные виды умственной деятельности, развиваются гетерохронно, не проводились применительно к сфере образования, хотя именно в процессе обучения и овладения учебной деятельностью протекает формирование и становление как когнитивной, так и исполнительной систем.

При рассмотрении нейрофизиологического обеспечения управления моторными и когнитивными действиями используется понятие «исполнительные функции». Универсальные учебные действия могут быть рассмотрены как психологическая операциональная система исполнительных функций, играющая решающую роль в готовности к школьному обучению и учебных достижениях в различных областях [St Clair-Thompson, Gathercole, 2006; Blair, Razza, 2007; Espy, McDiarmid, Cwik et al., 2004; Gathercole, Alloway, 2008; McClelland, Cameron, Wanless et al., 2007; Müller, Liebermann, Frye et al., 2008; Welsh, Nix, Blair et al., 2010; Bull, Espy, Wiebe et al., 2011; van der Sluis, DeJong, van der Leij, 2007; van der Ven, Kroesbergen, Boom, Leseman, 2013], а также в раннем научном обучении, направленном на исследование и проверку гипотез [Gropen, Clark-Chiarelli, Hoisington et al., 2011].

В данный момент общепринятой является точка зрения о трех основных составляющих исполнительных функций:

- подавление, которое включает: самоконтроль и контроль над помехами, отвлечениями (избирательное внимание и когнитивное подавление);
- рабочая память [Diamond, 2013];
- когнитивная гибкость, тесно связанная с креативностью [Lehto, Juujärvi, Kooistra et al., 2003; Miyake, Friedman, Emerson et al., 2000].

Уровень сформированности системы универсальных учебных умений релевантен уровню развития исполнительных функций, активирующихся при решении сложных учебных задач. В этом плане обучение выступает как многозначный содержательный контекст, способствующий изменению исполнительных функций. Активно «действующие» исполнительные функции становятся защитным фактором при возникновении проблем в обучении.

Исполнительные функции часто описывают как когнитивные функции высокого уровня, включающие ряд когнитивных процессов и поведенческих способностей, необходимых для контроля за вниманием, организации ответов во времени, планирования для достижения поставленных целей, способности усваивать и оперировать информацией в долговременной памяти, контролировать и отслеживать текущее состояние [Stuss, Alexander, Shallice et al., 2005], способность к логическим рассуждениям, решение проблем [Collins, Koechlin, 2012; Luht, Bramham, Morris et al., 2012].

Каждый процесс и каждая функция — комплексные образования и зависят от многочисленных подпроцессов и подфункций. Большинство авторов разделяют идею о том, что исполнительные функции являются важным механизмом адаптации, необходимым для адекватного, социально ответственного поведения взрослого человека, предполагающим эффективное самоуправление. В постоянно меняющейся среде они позволяют переключать мышление с одной ситуации на другую, подавляя (сдерживая) неадекватное поведение, позволяют строить планы, инициировать их исполнение и завершать начатое. Исполнительные функции опосредуют способность к организованному целенаправленному поведению (самоорганизации) и являются важнейшими аспектами успешной учебной и профессиональной деятельности.

### 3.4.3. Структура и содержание исполнительных функций системы мозга

Исследование исполнительных функций является одним из основных направлений в современной нейрофизиологии. В «Кембриджском психологическом словаре» (The Cambridge Dictionary of Psychology, 2009) исполнительные функции определяются как сложные формы познания и поведения: 1) метапознание; 2) программирование поведения; 3) торможение импульсивных реакций; 4) абстрагирование; 5) решение задач; 6) вербальная регуляция поведения; 7) переориентация поведения в зависимости от его последствий; 8) поведение в соответствии с социальными нормами; 9) задержка подкрепления; 10) длительность поведения; 11) целостность личности; 12) планирование поведения; 13) мораль; 14) самосознание.

В обзоре многочисленных исследований в данной области исполнительные функции определяются как процессы контроля высшего уровня, которые используются, когда недостаточно, опасно или невозможно действовать ав-

томатически или полагаясь на инстинкт, интуицию [Diamond, 2013]. Исполнительные функции также представлены в концепциях этического и морального поведения [Ardila, Surloff, 2004]. Их содержание толкуется следующим образом:

- волевой акт, планирование, целенаправленное действие, эффективное исполнение [Lezak, 1983];
- центральное исполнение, фонологическая сеть, визуально-пространственная система [Baddeley, Hitch, 1974];
- система контролирующего внимания [Norman, Shallice, 1986];
- сопутствующее управление информацией: когнитивная гибкость, образование понятий, реактивное поведение [Lafleche, Albert, 1995];
- анализ задачи, контроль и управление стратегией [Borkowski, Burke, 1996];
- произвольное внимание, когнитивная гибкость, целеполагание [A Taxonopomy, 2001];
- гибкость мышления, торможение, проблемно ориентированное мышление, планирование, контроль побуждений (импульсов), формирование понятий, абстрактное мышление, креативность [Delis, Kaplan, Kramer, 2001].

Также выделяют следующие исполнительные процессы: 1) внимание и подавление; 2) управление задачами; 3) планирование; 4) мониторинг; 5) кодирование [Smith, Jonides, 1999]. Исполнительные функции следует понимать как функцию контроля и координации моторных и когнитивных действий, направленных на достижение специфических целей деятельности. При этом исполнительный контроль необходим прежде всего в нестереотипных ситуациях (например, выбор адекватного действия из множества возможных, подавление несоответствующих действий, удержание плана действий и представлений об ожидаемых результатах в рабочей памяти), а также для оптимизации поведения [Кропотов, 2010].

На физиологическом уровне исполнительные функции фиксируются как последовательная активация процессов, образующих систему управления: внимание и рабочая память (компонента P2), подавление ответа (компонента N2), вовлечение в действие (компонента P3b), мониторинг/контроль действий (компонента P4); на психологическом — через проявление общей способности к организации, планированию, регуляции и оценке своей деятельности в процессе усвоения учебной информации; в обучении — в метакогнитивных процессах, поддерживающих решение сложных учебных задач, требующих работы с информацией, ее обработки и усвоения [Кропотов, 2010] (табл. 3.3).

Исследователи выделяют разные подструктуры исполнительных функций, но это не исключает общую точку зрения относительно предназначения функций. Исполнительные функции могут рассматриваться как вычислительные процессы или алгоритмы обработки информации, которые вызывают активацию определенного действия в заданном интервале времени и сложившихся обстоятельствах или подавляют репрезентацию действия, ненужного в данной ситуации. Таким образом, именно исполнительные функции на уровне нейронных сетей определяют операции, выполняемые при репрезентации действий и планов, хранящихся в коре и обеспечивающих в том числе целеполагание, произвольность и контроль учебной деятельности.

Таблица 3.3. Классификация исполнительных операций и метакогнитивных процессов (см.: [Кропотов, 2010, с. 261])

Основная операция	Исполнительная функция	Метакогнитивный процесс
Операция вовлечения	Активация нейронов фронтально-теменной коры (особенно дорсолатеральной зоны), ответственной за формирование репрезентации планируемого действия с целью обеспечить возможность реализации данного действия	Произвольное внимание (сосредоточение на важной информации, переключение с одного задания на другое)
Операция отвлечения	Подавление активности нейронов фронтальной коры, ответственных за формирование репрезентации планируемого действия, чтобы воздержаться от его исполнения	Произвольное внимание и ингибиторный контроль (фильтрация менее значимых стимулов, мыслей, ощущений, снижение отвлекающих импульсов, отсеивание лишней информации, торможение, подавление импульсов и действий)
Рабочая память	Временное хранение информации о планируемых действиях (от нескольких минут до нескольких часов) для ее активного использования при операциях отвлечения и вовлечения	Планирование и реализация планов (удержание текущих целей и планов, возможность сохранения сенсорной информации и манипуляция ею длительное время, чтобы достигнуть результата, не отвлекаясь, вплоть до окончания реализации плана действий; управление, интеграция информации для планирования и управления поведением)
Операция мониторинга	Сравнение результатов реализованного действия с ожидаемым. При наличии расхождения инициируется новое действие для его устранения	Самоконтроль (контроль поведения, спонтанных действий и когнитивных процессов, сопоставление цели и результата, снижение импульсивности)

Само понятие «исполнительные системы» свидетельствует о том, что совокупность образующих его операций реализуется комплексом корковых и подкорковых структур, связанных между собой. Имеются в виду теменные и фронтальные области — место локализации репрезентации действий, активация которых обеспечивает доступ к хранящейся информации об этих действиях. Подкорковые структуры охватывают базальные ганглии и ядра таламуса.

Теменные и фронтальные области, участвующие в работе исполнительных систем, включают первичную моторную кору (поле Бродмана 4), добавочную моторную область (поле 6), заднюю часть поясной извилины и префронтальную кору. Граница с теменной корой проходит по центральной борозде.

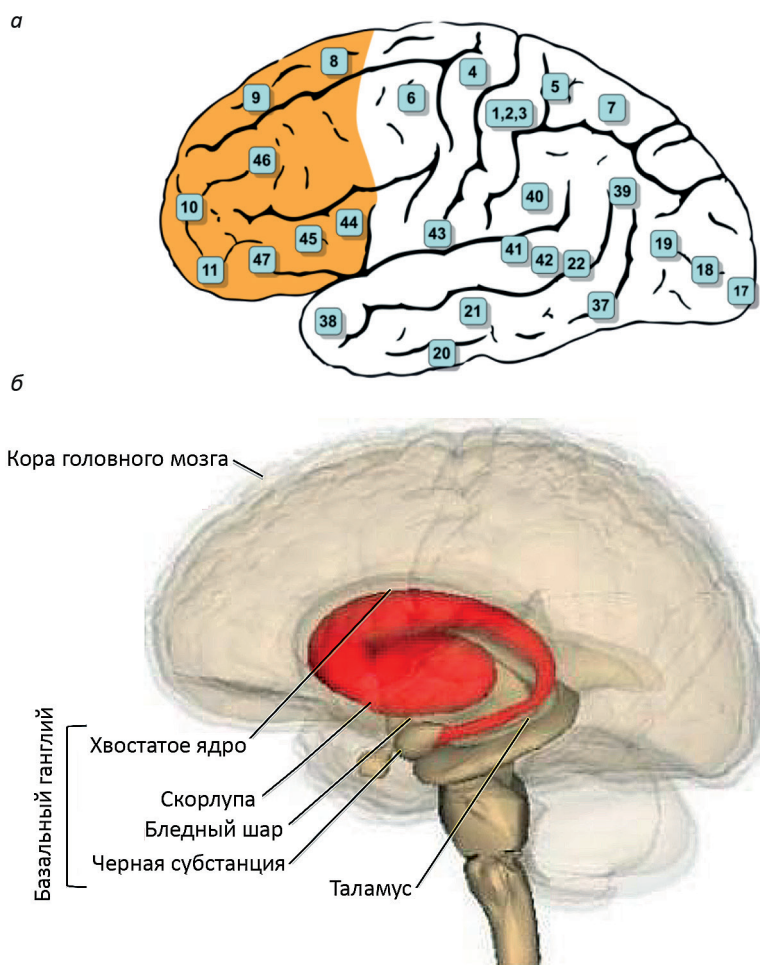


Рис. 3.5. Префронтальная кора (*a*) и строение стриатума (*б*)

Топографически области префронтальной коры головного мозга соответствуют полям Бродмана 8–11, 44–47 (рис. 3.5, а). Функционально префронтальная кора не только обеспечивает работу исполнительных систем мозга, но и в целом отвечает за сложные когнитивные (оценивание обстановки, принятие решений, абстрактное мышление) и поведенческие функции и эмоции. Зоны префронтальной коры вовлечены в системы управления временем, импульсами, суждениями, мышлением, планированием. Нейронная архитектура префронтальной коры настолько сложная по своей организации относительно других образований коры, что можно без преувеличения называть ее субстратом высших когнитивных функций. Технологии критического мышления, так активно применяемые в образовании, проблемно ориентированное обучение, опирающиеся на анализ условий задачи и поиск противоречий, требуют, чтобы в работу нейронных сетей была вовлечена префронтальная кора. От ее активности зависит то, как человек планирует свое будущее, рационально распределяет ресурсы, способен логично выстраивать аргументацию.

Префронтальная кора отвечает за действия, которые позволяют человеку оставаться нацеленным на достижение определенного результата, быть социально ответственным и эффективным. Она вовлечена в осуществление комплексных навыков внимания и организационных навыков, включая соблюдение правил, логическое рассуждение, подавление импульсов, принятие решений [Casey, Trainor, Giedd et al., 1997]. Важно еще раз заметить, что префронтальная кора ассоциируется не с действиями как таковыми, а с мониторингом исполнения действий, то есть именно с исполнительными функциями.

Структуры коры, обеспечивающие работу исполнительной системы, имеют прямые и не прямые пути, соединяющие ее с подкорковыми структурами, с соответствующими частями базальных ганглиев, проецирующих свои связи на соответствующие ядра таламуса, реципрочно связанные с корой. Нейроны префронтальной коры реципрочно связаны с дорсомедиальным ядром таламуса. Премоторная кора имеет «входы» от латеральных таламических ядер и проецируется обратно в латеральные таламические ядра. Поясная извилина имеет реципрочные связи с передним ядром таламуса. В этой системе связей особая роль принадлежит стриатуму<sup>2</sup>, где сосредоточено больше всего проекций от префронтальной коры (рис. 3.5, б).

Взаимодействие корково-подкорковых структур при контроле и управлении поведением может быть представлено в виде модели выбора действий

---

<sup>2</sup> Стриатум (полосатое тело) — (от лат. *corpus striatum*) функциональное объединение подкорковых образований мозга, расположенное в самой передней отделе головного мозга: самая большая часть из 5 клеточных компонентов базальных ганглиев. Структурно представлен дорсальной (хвостатое ядро, чечевицеобразное ядро, скорлупа) и вентральной (прилежащее ядро) частями.

[Кропотов, 2010, с.268] (рис. 3.6). Нейроны стриатума — хвостатое ядро и скорлупа, входящие в состав выбора программ, проецируют свои связи в области «бледный шар / черная субстанция» (ядра базальных ганглий) и подавляют активность последних. По сравнению с нейронами стриатума нейроны бледного шара и черной субстанции характеризуются высокочастотной спонтанной активностью. Выбранное действие вызывает активацию нейронов стриатума и подавление высокочастотной активности бледного шара.



Рис. 3.6. Модель выбора действий

Нейроны бледного шара имеют

связи с таламусом, подавляют его активность. Таламус находится под постоянным влиянием спонтанной активности бледного шара, которое выражается в торможении. При ингибировании нейронов бледного шара уровень их импульсной активности снижается, прекращается тормозящее влияние на нейроны таламуса и активизируются таламокортикальные проводящие пути. Фактически таламус — это доступ («ворота») к коре для выбранного действия. Стриатумные проекции префронтальной коры топографически организованы в виде мозаики: любой нейрон префронтальной коры проецируется на разные области стриатума. В то же время функционально связанные области коры (за счет внутренних кортикальных связей) проецируются в одну и ту же зону стриатума. На уровне стриатума представлена функциональная карта коры, а не ее топографическая проекция. В соответствии с функциональными проекциями на конкретные области стриатума активирующие внутренние связи коры запускают программу селекции действия, локально тормозя одни и усиливая другие действия на уровне коры.

#### 3.4.4. Репрезентация сложных умственных действий

Рассмотрим более подробно исполнительные функции на уровне отдельных действий и операций. Работа системы внимания активирует нейронную сеть, объединяющую фронтальные теменные, височные области коры и базальные ганглии. Посредством операции вовлечения произвольное внимание позволяет человеку ориентироваться в быстро меняющейся ситуации, выбирая действия, наиболее релевантные ситуации, и подавляя те, которые уже не соответствуют изменившимся условиям. Успех деятельности во многом определяется тем, насколько действие подготовлено. Таким образом, планирование

оказывается неотъемлемой частью жизнедеятельности человека, так же как и готовность к торможению ранее планируемого действия, если оно перестало быть актуальным.

Подробно нейрофизиологические механизмы операции вовлечения были рассмотрены в разделе 3.2. Данные литературы показывают, что для испытуемых, ориентированных на поиск альтернативных решений и некоторую неопределенность, характерна более устойчивая глобальная организация межцентральных взаимодействий корковых процессов, которые объединены в целостный интегрированный акт, по сравнению с теми, кто действует по ранее изученному алгоритму [Свидерская, Королькова, Николаева, 1994]. Исследования с использованием функциональной МРТ, ЭЭГ и eye-tracker (ай-трекер) позволили выявить, что биоэлектрическая активность и пространственная синхронизация биопотенциалов головного мозга меняются в зависимости от стадии планирования (в рамках одной задачи) и различаются на этапах планирования иерархии действий и планирования поисковых действий [Hodgson, Denehy, Ntoumenopolous, 2000; Unterrainer, Rauss, Kaller et al., 2008; Keller, Wang, Zhou et al., 2010]. Таким образом, уже на уровне операции вовлечения ярко проявляются различия в работе исполнительской системы, связанной с селекцией и подготовкой необходимого действия, его выбором. Эта селекция происходит на основе сравнения сенсорных сигналов, результаты которого передаются в префронтальную кору и активируют мозговые процессы, ответственные за усиление или подавление подготовленных действий.

Нейронные механизмы подавления обеспечиваются процессами, происходящими в базальных ганглиях. Сама кора не в состоянии полностью подавить программу действий, в связи с чем нейрональный механизм подавления подготовленных действий реализуется через таламо-кортикальное взаимодействие, контролируемое базальными ганглиями посредством прямых проводящих путей. Ключевая роль в исполнении подавления действий принадлежит вентролатеральной префронтальной коре. Соответственно, недоразвитие вентролатеральной префронтальной коры может рассматриваться как причина синдрома импульсивности.

В отличие от операций вовлечения и подавления, когнитивный механизм которых модулируется процессами сенсорной обработки информации, операция мониторинга является критичной для принятия решений и их оптимизации. Мониторинг действий подразумевает механизм оценки качества исполнительского контроля, который активирует исполнительские системы, связанные с вычислением ошибки. В операции мониторинга существенную роль играет передняя поясная извилина (рис. 3.7), функционально обеспечивающая сравнение и оценку текущих действий и их результатов.

Передняя поясная извилина не является функционально гомогенной структурой. Моторная область поясной извилины имеет «входные» и «вы-





Рис. 3.7. Поясная извилина в структуре мозга:

*а* — анатомия поясной извилины; *б* — структуры, вовлеченные в мониторинг действий (ПССК — первичная соматосенсорная кора)

ходные» связи с первичной моторной, премоторной и добавочной моторной областями коры, которые ответственны за хранение точных образов планируемых действий. Соответственно, моторная область принимает участие в инициации новых действий. Вентральная (передняя) часть передней поясной извилины получает входные импульсы преимущественно из аффективной системы мозга (лимбической) посредством прямых связей с миндалиной или опосредованно, через переднее ядро таламуса. Дорсальная (задняя) часть поясной извилины обладает обширными реципроктными связями с латеральной, передней и медиальной зонами префронтальной коры, вовлекаемыми в обеспечение когнитивных функций, в связи с чем ее часто называют когнитивной. Данные нейровизуализации однозначно свидетельствуют об активации дорсальной части передней поясной извилины при решении когнитивных тестовых заданий и вентральной части — в состояниях, определяемых эмоциями и мотивацией.

Именно когнитивная часть передней поясной извилины выполняет мониторинг действий, что связано с необходимостью постоянного сравнения и оценки текущих событий и действий. Способность к такому мониторингу и сравнению результатов текущих действий с внутренне формируемыми целями является необходимым условием адаптации и выживания. Фактически операция мониторинга является нейрофизиологическим механизмом исполнительного контроля, активирующего исполнительные системы в ситуации рассогласования цели и результата.

При ЭЭГ-исследованиях контролирующей функции в парадигме вызванных потенциалов присутствие операции мониторинга фиксируется посредством негативности, связанной с ошибкой. Данная компонента регистрируется в условиях трудного тестового задания, при выполнении которого совершается ошибка, примерно через 100 мс после реализации некорректного акта и характеризуется центрально-фронтальной топографией. Процессы монито-

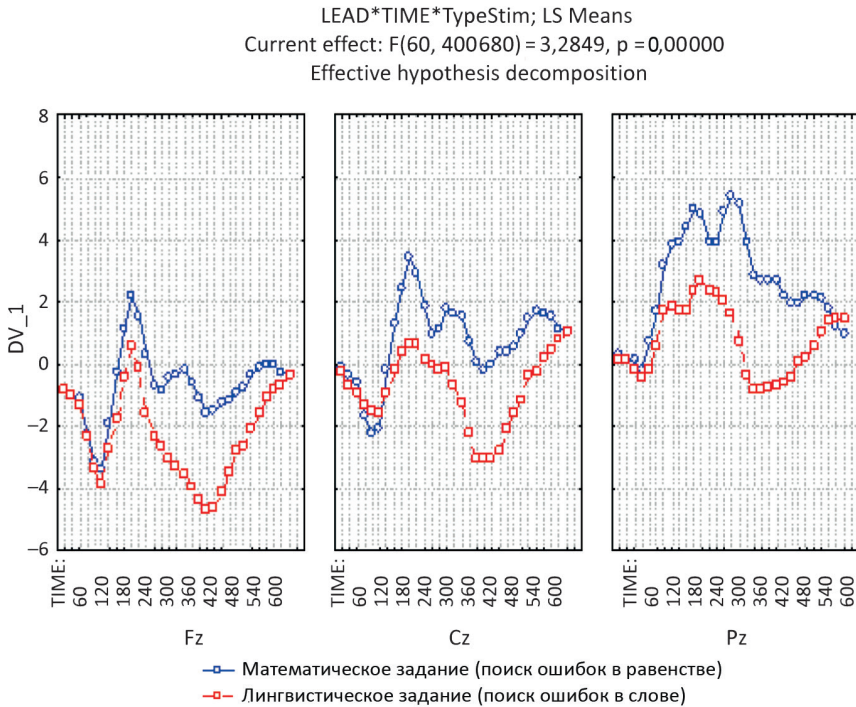


Рис. 3.8. Сравнительный анализ усредненных когнитивных ВП при выполнении математических и лингвистических заданий на поиск ошибки между отведениями Fz, Cz, Pz (лобное, центральное и теменное отведения по средней линии). По оси абсцисс указано время, ординат — уменьшенное в 10 раз значение пика электрической активности, Гц

ринга ошибок фиксируются и в парадигме Go/No-Go (см. раздел 2.4), например в ситуации поиска ошибок (есть ошибка в решении или ее нет), скажем при работе с математическими или лингвистическим заданиями.

При выполнении математического и лингвистического заданий<sup>3</sup>, направленных на одинаковое контролирующее действие (поиск ошибки), проведен сравнительный анализ усредненных когнитивных ВП (рис. 3.8). Динамика изменений ВП в ответ на предъявляемые стимулы демонстрирует значимые различия: успешность решения заданий варьирует в зависимости от типа контролирующего действия и от вида задания (математическое или лингвистическое). Результаты попарных сравнений заданий, усредненных по выборке ВП в лобных, средних и затылочных центральных отведениях (Fz, Cz, Pz), показав-

<sup>3</sup> Результаты исследования получены Д. Курмакаевой в рамках гранта РГНФ (№14-06-00521, 2014–2016 годы) «Нейрофизиологические механизмы сложных видов умственной деятельности у студентов» под руководством С. Н. Костроминой.

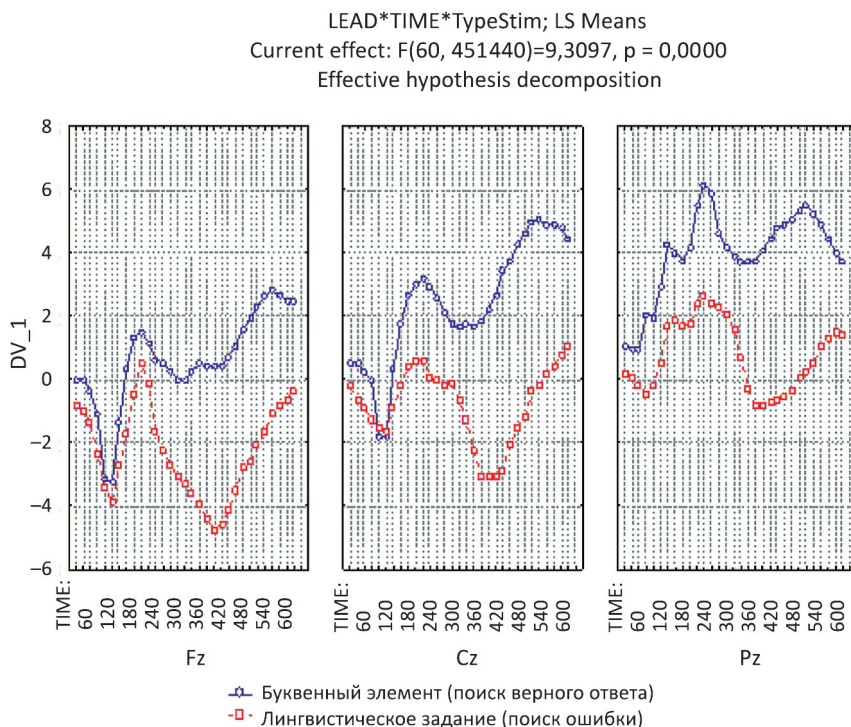


Рис. 3.9. Сравнительный анализ усредненных когнитивных ВП, полученных при выполнении лингвистических заданий с разными контролирующими действиями, между отведениями Fz, Cz, Pz (лобное, центральное и теменное отведения по средней линии). По оси абсцисс указано время, по оси ординат — уменьшенное в 10 раз значение пика электрической активности, Гц

ли, что для всех типов заданий (и математических и лингвистических) наблюдаются ярко выраженные ВП в латентном периоде от 120 до 300 мс в лобном и центральном отведениях с характерным изменением негативного пика на позитивный, что свойственно для проявления компоненты N200 с переходом в P300. Согласно динамике временных изменений мощности ВП, контролирующее действие «поиск ошибки» свидетельствует о явной активации произвольного внимания (что выражается в большей амплитуде волны P300b).

В математических заданиях отчетливо проявляется компонента P400, традиционно сочетающаяся с процессами контроля и мониторинга. Ее локализация свидетельствует о том, что источник генерации находится в области передней поясной извилины (центральные и теменные отведения, отвечающие за мониторинг действий). Амплитуды пиков P400 для разных действий учебного контроля значительно различаются: применительно к заданиям с поиском верного ответа амплитуда выше. Возможно, при предъявлении и решении математиче-

ских заданий на поиск верного ответа нерелевантный стимул идентифицируется точнее, чем при поиске ошибки.

В диапазоне волны N400 ВП, связанные с процессами семантической обработки слова (рис. 3.9), зафиксированные в центрально-теменных зонах, проявляются с более выраженной амплитудой в ответ на контролирующее действие «поиск верного ответа» по сравнению с действием «поиск ошибки в слове». На пике в диапазоне 560 мс, напротив, более выраженная амплитуда наблюдается, когда выполняется задание с поиском ошибки, если сравнивать с заданиями на поиск правильного ответа. Таким образом, для лингвистических заданий семантическая обработка имеет место как во время контролирующего действия «поиск верного ответа», так и во время действия «поиск ошибки». Различия проявляются только во временных сдвигах (более позднем латентном периоде при выполнении инструкции по «поиску ошибки»), связанных, по всей видимости, с тем, что образ предъявляемого слова сопоставляется с хранящейся в долговременной памяти репрезентацией его словоформы и правилами русского языка.

«Одним из удивительных свойств нейронов префронтальной коры является их способность к сохранению частоты разрядов нейронов на протяжении длительного интервала времени, включающего и происходящее событие, и длительное время после его окончания» [Кропотов, 2010, с. 288]. Это свойство отражает способность префронтальной коры поддерживать репрезентацию стимула и действий довольно длительное время, инициируя целенаправленное поведение и достижение целей. С учетом указанного свойства была разработана концепция рабочей памяти [Naxby, Ungerleider, Horwitz et al., 1995]. Это психические процессы, позволяющие удерживать текущие цели и планы действий, а также информацию, необходимую для их реализации. Они позволяют манипулировать информацией в уме от нескольких секунд до нескольких минут и составляют основу для совершения таких сложных умственных действий, как принятие решения и планирование.

Клеточной основой хранения информации в рабочей памяти являются нейроны префронтальной коры. Нейронная сеть, отвечающая за поддержание модально специфических следов памяти (зрительно-пространственных, зрительно-образных/цветовых и вербальных), состоит из реципрочно связанных префронтальных и ассоциативных височно-теменных областей коры. Нейронная сеть обеспечивает удержание планов действий, формируемых на основе синтеза сенсорной информации, доставляемой через префронтальную кору через восходящие пути. Три модальности определяют три комплекса нейронных сетей, обеспечивающих удержание информации (рис. 3.10). Так, вентральный проводящий путь обеспечивает распознавание формы за счет затылочно-теменных связей, дорсальный, на основе нижневисочных связей, —

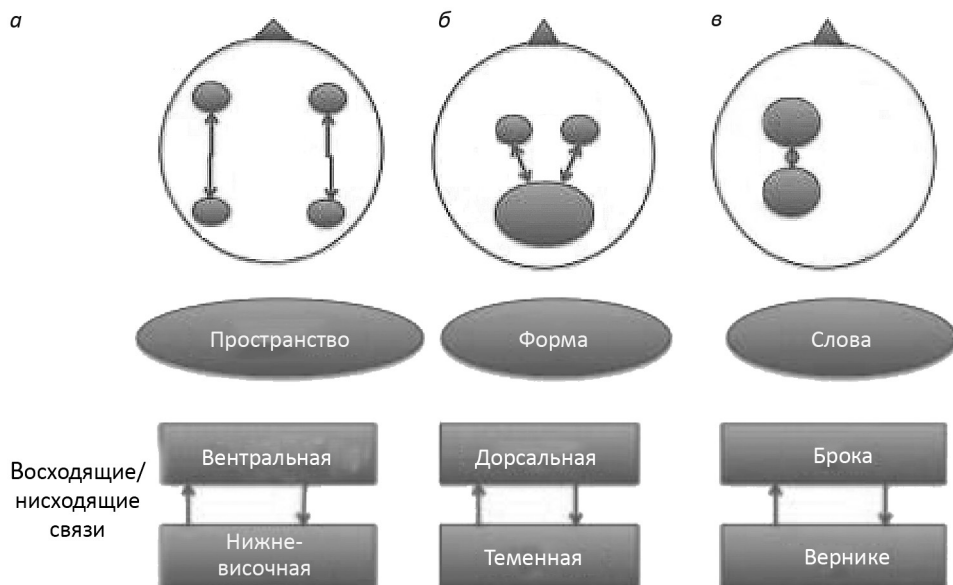


Рис. 3.10. Три системы рабочей памяти [Кропотов, 2010, с. 289]

ориентацию в пространстве, связь зон Брока — Вернике — способность выразить словами план действий.

Иллюстрацией работы системы рабочей памяти может служить серия экспериментов О. А. Чувгуновой<sup>4</sup>, продемонстрировавших различия во временной динамике данных ЭЭГ в процессе решения задач на формирование внутреннего плана действий — задачи на перестановку в 2, 3 и 4 хода [Chuvgunova, Kostromina, 2016]. Независимо от уровня сложности спектры в отведениях задних отделов мозга характеризуются пиками в альфа-диапазоне (за исключением задач высокого уровня сложности, имеющих также пики в тета-диапазоне в затылочных отведениях) (рис. 3.11). При решении задач всех уровней сложности отмечается сходная картина во фронтальных отделах: пики в тета- и альфа-диапазонах, наиболее ярко они выражены по средней линии и снижаются по направлению от медиальных отделов к латеральным с обеих сторон. Наиболее высокие пики в тета-диапазоне наблюдаются при решении задач среднего уровня сложности, активность в тета-диапазоне несколько ниже при решении сложных задач. В сравнении с задачами высокого и среднего уровня сложности пики в тета-диапазоне при решении простых задач выражены слабее.

<sup>4</sup> Результаты исследования получены О. А. Чувгуновой в рамках гранта РГНФ (№14-06-00521, 2014–2016 годы) «Нейрофизиологические механизмы сложных видов умственной деятельности у студентов» под руководством С. Н. Костроминой.

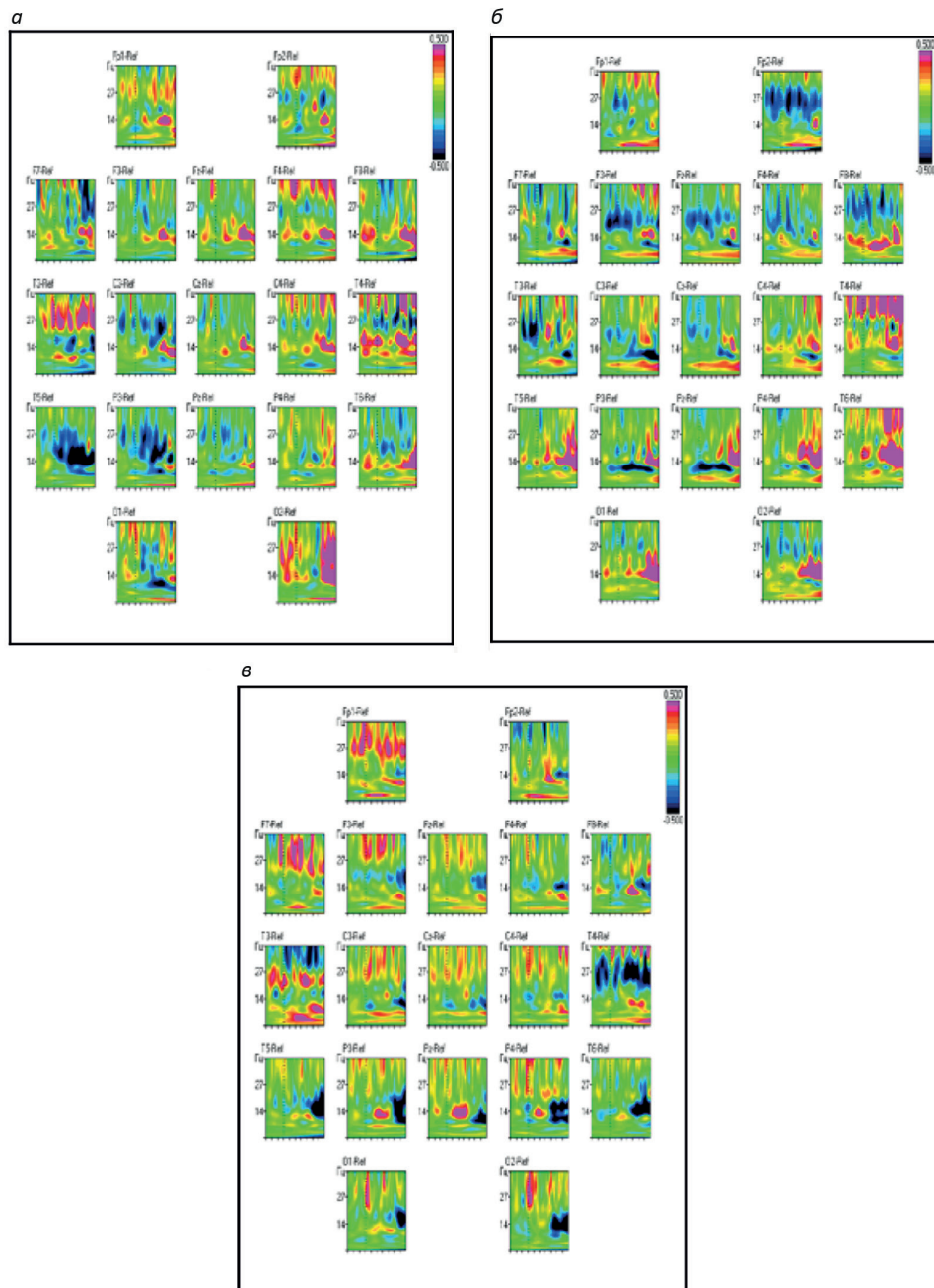


Рис. 3.11. Разность усредненных проб:  
 а — простые рандомизированные задачи — простые тренировочные задачи;  
 б — средние новые задачи — средние рандомизированные задачи; в — сложные новые задачи — сложные рандомизированные задачи

На уровне деятельности все простые задания (тренировочные, рандомизированные, новые) были решены наиболее успешно по сравнению с задачами средней и высокой сложности. Это согласуется с данными о более высокой мощности в тета-диапазоне при решении более трудных задач, требующих большего числа перестановок [Chuvgunova, Kostromina, 2016]. Повышение спектральной мощности в тета-диапазоне может рассматриваться как отражение того, насколько задействована рабочая память. Наличие же пиков в альфа-диапазоне свидетельствует о нормальном функционировании мозга в процессе обработки поступающей информации, достаточном энергетическом тоне коры [Кропотов, 2010].

Как на этапе формирования способа действия, так и на этапах закрепления сформированного ранее способа действия независимо от уровня их сложности и новизны решение задач на планирование требовало вовлечения процессов рабочей памяти. С повышением сложности планирования возрастала и нагрузка на рабочую память. При повторном решении задач средней сложности во фронтальных отделах мощность в бета-, альфа-, тета-диапазонах была ниже, чем при их решении в первый раз. Таким образом, повторное решение потребовало меньших энергетических затрат, хотя на уровне деятельности значимых различий выявлено не было.

Также при решении сложных задач на планирование на всех этапах выполнения был выявлен ряд различий в работе левого и правого полушарий. Например, при повторном решении задач в правом полушарии активность снижалась как в высокочастотном, так и в низкочастотном диапазоне, в левом полушарии повышалась бета-активность, что можно рассматривать как проявление алгоритмизации усвоенного ранее способа решения сложных задач и влияние на формирование внутреннего плана действий. Правые фронтальные отделы отвечают за разработку плана, а левые — за выполнение уже сложившегося алгоритма [Newman, Carpenter, Varma et al., 2003]. Возможно, тренировочные задания позволили усвоить алгоритм решения, поэтому в правом полушарии на этапе повторного решения сложных задач активность снижается, а в левом — увеличивается, что является отражением реализации усвоенного ранее способа действия.

При сравнении данных ЭЭГ, полученных при решении новых простых задач, с данными, собранными при решении тренировочных и рандомизированных простых задач, не было установлено существенных различий. Однако вейвлет-анализ позволил выявить, что при решении новых простых задач во фронтальных отделах мозга активность в бета- и тета-диапазонах ниже, а в задних отделах мозга мощность этих частот ниже, если сравнивать с аналогичными параметрами при решении рандомизированных и тренировочных заданий. Вероятно, предшествующий опыт работы с подобными задачами облегчает переработку поступающей информации. Активность ответственных за сложные

виды интеллектуальной деятельности фронтальных отделов возрастает при применении усвоенного способа действия в новых условиях. При решении же новых задач средней сложности активность в бета-диапазоне, прямо коррелирующая со сложностью когнитивной задачи [Кропотов, 2010], в левой лобной области была выше, чем при повторном решении сходных (но не полностью идентичных) задач. В сравнении же с тренировочными задачами энергетические затраты при решении новых задач средней сложности были меньше. Эти данные позволяют сделать вывод, что предварительная тренировка облегчила решение как на этапе закрепления способа действия, так и на этапе применения в отношении новых заданий. При повторном решении задач средней сложности этап закрепления был наименее энергоемким и требовал наименьшей нагрузки на рабочую память по сравнению с первичным предъявлением заданий и работой с новыми заданиями. На уровне деятельности успешность решения задач средней сложности при повторном предъявлении также была несколько выше по сравнению с успешностью выполнения тренировочных заданий (хотя различие не значимо статистически) и новых задач (статистический критерий сравнения Манна — Уитни при обработке данных эмпирического исследования  $U_{\text{эмп}} = 339,5; p \leq 0,01$ ). При решении новых задач высокой сложности отмечалась более высокая активность в тета- и альфа-диапазонах во фронтальных отделах и по средней линии, в левых фронтальных отделах высокочастотная активность в бета-диапазоне была ниже, а в правых отделах — выше, чем при решении тренировочных и рандомизированных задач. Таким образом, применение способа действия к новым задачам, которые решаются по тому же принципу, но сопровождаются несколько измененными условиями, потребовало больше задействовать рабочую память. При построении последовательности действий для решения новых сложных задач опять проявилась бóльшая активность в бета-диапазоне в правом полушарии и более низкая активность в левом полушарии, чем при решении тренировочных и рандомизированных задач. Возможно, в данном случае бóльшая активность правого полушария связана с генерацией плана действий в новых условиях, пока процесс еще не алгоритмизирован полностью.

Полученные данные прямо свидетельствуют о роли рабочей памяти в решении задач на планирование, особенно при работе со сложными многошаговыми, многовариантными алгоритмами решения учебных задач. В этом плане можно дать практическую рекомендацию: в учебный процесс необходимо включать задания, способствующие тренировке и совершенствованию рабочей памяти. Целесообразно поддерживать оптимальное функциональное состояние учащихся, не допуская когнитивной перегрузки, особенно при работе со сложными, поисковыми заданиями. Даже при условии тренировки повторное предъявление и самостоятельное решение новых видоизмененных задач на основе усвоенного способа действия вызывают значительную нагрузку на рабочую память. В связи с этим необходимо помнить, что эффект обучения от-



срочен и на уровне нейронов и проявляется спустя некоторое время (5–40 мин после окончания процедуры обучения) [Данилова, 2004]. Соответственно, в течение одного и того же занятия формирование (знакомство и осуществление), закрепление нового способа действия, а также его применение в новых условиях неэффективны. Исследование О. А. Чувгуновой демонстрирует, что этап тренировки не гарантирует быстрой и полной автоматизации сложных умственных действий, снижения нагрузки на рабочую память и энергетические ресурсы учащегося на этапе повторения и решения новых задач. Контроль и оценку успешности решения задач на основе усвоенного способа действия при условии формирования внутреннего плана действий целесообразнее провести после перерыва, периода отдыха.

Кортикальная дофаминергическая система обеспечивает реализацию функций префронтальной коры, в то время как стриатумная — функции передней поясной извилины, отвечающей в том числе за мониторинг действий. Нейроны корково-подкорковых структур (стриатума и префронтальной коры), образующих исполнительную систему мозга, продуцируют дофамин, который является основным медиатором исполнительной системы. Сегодня известно, что дофамин оказывает критическое действие на процессы рабочей памяти [Кропотов, 2010, с. 294]. Дефицит дофаминергической системы стриатума у школьников с синдромом дефицита внимания и гиперактивности может приводить к укорачиванию «следа» значимого стимула в памяти, что естественным образом влечет за собой ослабление рабочей памяти, невнимание (трудности концентрации длительное время на конкретном действии), склонность отвлекаться (постоянное переключение с одного объекта на другой), импульсивность (трудности с подавлением спонтанных действий и желаний), гиперактивность (скачкообразное переключение с одного моторного действия на другое), стабильно низкий темп учебной деятельности.

### 3.4.5. Роль исполнительной системы в обучении

Для обучения ведущее значение имеют функции префронтальной коры, которые позволяют не только управлять репрезентациями усвоенных действий, но и формулировать цели, вырабатывать планы их достижения. Именно эти функции относятся к универсальным учебным действиям, обеспечивающим умение принять учебную задачу и планировать свои действия. Кроме того, вовлеченность префронтальной коры в решение сложных задач поддерживает способность преодолевать препятствия и неуспех при отсутствии внешнего управления, действовать и реагировать обдуманно, просчитывать ситуацию, выбирать оптимальный из нескольких вариантов.

Уровень развития исполнительных функций играет решающую роль в раннем научном обучении, направленном на исследование и проверку

гипотез [Gropen, Clark-Chiarelli, Hoisington et al., 2011], в определении того, насколько ребенок готов к школьному обучению и достижениям в различных областях обучения [St Clair-Thompson, Gathercole, 2006; Blair, Razza, 2007; Espy, McDiarmid, Cwik et al., 2004; Gathercole, Alloway, 2008; McClelland, Cameron, Wanless et al., 2007; Müller, Liebermann, Frye et al., 2008; Welsh, Nix, Blair et al., 2010].

Для лучшего понимания роли исполнительной системы в обучении достаточно вспомнить трактовку учебной деятельности, которую Дж. Брунер частично отождествлял с усвоением, включающим три процесса: получение новой информации, преобразование, приспособление информации к решению задач и проверку/контроль.

Получение новой информации осуществляется на базе уже имеющегося опыта. Фактически речь идет о некоей учебной задаче, предлагаемой в форме условий, которые обучающийся должен принять. В нейропсихологическом контексте рассматривается нейрофизиологическое реагирование на предъявление стимула — учебного задания, при этом задействуются различные каналы восприятия, аффективная система активируется в зависимости от степени эмоциональной окрашенности учебной информации. Трансформация знаний определяется как процесс перестройки имеющегося знания для решения новой задачи на основе учебных действий. Проверяется степень адекватности способов обращения с информацией, содержащейся в задаче. В отечественной традиции указанные процессы соотнесены с контролем, самоконтролем, оценкой и самооценкой.

Для реализации плана и способа действий необходимо вовлечение рабочей памяти. В ее функционировании ведущим органом является префронтальная кора, которая позволяет управлять и сохранять задачи в памяти, координировать их с другими задачами. Передняя поясная извилина задействована в мониторинге действий по обработке информации, поддержании селективного внимания к одним задачам и игнорировании других [Herbette, 2004].

Чередование разной информации и разных видов учебных заданий требует от школьника высокой переключаемости, которая обеспечивает фокусировку на новых стимулах, принятие новых учебных задач и изменение алгоритмов решения учебных заданий. В одном из последних исследований было показано, что развитие переключаемости играет ключевую роль в раннем развитии чтения [Cartwright, 2012]. Уже в возрасте 2,5 лет дети способны успешно выполнять простейшие задания, требующие когнитивной гибкости. Способность переключаться и адаптироваться к новым условиям задачи развивается в течение детства и ухудшается в пожилом возрасте. Маленькие дети и пожилые взрослые склонны использовать исполнительные функции в ответ на вызовы среды (реактивно), тогда как дети старшего возраста и молодые взрослые более планомерны в использовании исполнительной системы и склонны

обдумывать, планировать свое поведение, прогнозировать его последствия [Diamond, 2013].

Особая роль в обучении принадлежит исполнительному контролю, причем как ингибиторному, ответственному за торможение импульсивного поведения, так и когнитивному. В процессе осуществления учебной деятельности функции когнитивного контроля состоят в избирательной активации или подавлении обработки данных, соответствующих или нет решаемой задаче. Ее реализация обеспечивается активацией кортикально-подкорковых структур — базальных ганглиев и префронтальной коры головного мозга (избирательная активация).

Исполнительный контроль развивается на протяжении длительного времени. От рождения до 3 лет имеет место внешнее управление: родители помогают ребенку контролировать эмоции и поведение. Однако уже в 3 месяца ребенок может не обращать внимание на социальное взаимодействие, если он устал и хочет избежать перенасыщения стимулами и дистресса [Harman, Rothbart, Posner, 1997]. В возрасте до одного года фиксируются элементы исполнительного моторного контроля [Пушина, 2005]. С 3 до 6 лет бурно развивается исполнительный контроль, что проявляется в формировании способности контролировать импульсы, переключать внимание с одного объекта на другой, происходит становление контроля импульсов и способности откладывать вознаграждение [Diamond, Taylor, 1996; Lewis, Todd, 2007; Mischel, Mischel, 1983; Thompson, Barresi, Moore, 1997]. В детском возрасте поведение определяется системой проверки и уравнивания между различными частями мозга, взаимодействующими друг с другом [Tarullo, Obradovic, Gunnar, 2009]. Примерно к 6 годам можно говорить о частичном созревании префронтальной коры, позволяющем начать целенаправленное обучение за счет развития способности к произвольному поведению. Отделы мозга, участвующие в когнитивном контроле, полностью созревают только к концу юности.

Лонгитюдные исследования показали, что уровень развития подавления может рассматриваться как предиктор успешности в течение жизни, включая взрослость. Дети, которые в возрасте от 3 до 11 лет отличались более высоким уровнем ингибиторного контроля, в подростковом возрасте лучше относились к учебе, были менее склонны к рискованному поведению. Став взрослыми, они были более здоровыми как физически, так и психически, более законопослушными, больше зарабатывали и чувствовали себя более счастливыми, чем те, у кого в детстве был слабый ингибиторный контроль. По мере старения уровень ингибиторного контроля снижается (ухудшается) [Diamond, 2013].

Таким образом, можно говорить о полноценной работе исполнительной системы только к окончанию школы, поскольку обеспечивающие ее функционирование структуры мозга созревают к юношескому периоду (табл. 3.4).

Таблица 3.4. Возрастная динамика формирования компонентов учебной деятельности и исполнительных функций

Возраст	Учебное действие	Исполнительная функция
Дошкольный возраст (до 6–7 лет)	Формирование предпосылок учебной деятельности: умение действовать по образцу, умение действовать по правилу, умение ориентироваться на систему требований	<p><i>Произвольность внимания (операции вовлечения и отвлечения):</i> фокусировка на нужных объектах и подавление отвлекающих стимулов.</p> <p><i>Переключаемость и элементы когнитивной гибкости:</i> способность переключаться и адаптироваться к новым условиям задачи, трудности переключения при смене критерия сортировки (смены правила).</p> <p><i>Рабочая память:</i> удержание информации в памяти, возможность сохранения и оперативной обработки репрезентаций, способность предвосхищать местоположение движущегося перед глазами объекта, улучшение возможностей планирования. Для детей 4–5 лет — развитие способности к решению задач в 2–4 хода, снижение количества perseverативных (повтор ошибочного действия) стратегий несмотря на сложности с мысленным манипулированием ситуаций. В 6–10 лет — формирование внутреннего плана действий для решения задач от 3 до 5 ходов. После 12 лет — удержание плана действий в 6–7 ходов и более.</p> <p><i>Частичный исполнительный моторный контроль:</i> становление контроля импульсов, игнорирование нерелевантных стимулов, сложности противостояния эмоциональному побуждению и трудности с торможением определенного поведения.</p> <p><i>Мониторинг действий:</i> способность заметить ошибку своего поведения, затруднение с использованием информации об ошибке для контроля над собственным поведением.</p> <p><i>Когнитивный контроль:</i> трудности совмещения двух противоречащих характеристик одного и того же объекта</p>
Младший школьный возраст (8–11 лет)	Формирование структуры основополагающих учебных умений, позволяющих полноценно учиться: умение принять учебную задачу, умение планировать, умение контролировать свои действия и результат, умение оценивать работу своего внимания	<p><i>Полноценный ингибиторный контроль:</i> способность к подавлению и торможению желаний и импульсов, противостояние эмоциональному побуждению, относительно длительная при релевантных стимулах возможность успешной деятельности в условиях помех.</p> <p><i>Рабочая память:</i> удержание в памяти множества объектов, оперирование несколькими репрезентациями, усвоение разнообразных карт учебных действий и схем, обеспечивающих регуляцию поведения на операциональном</p>

Окончание табл. 3.4.

Возраст	Учебное действие	Исполнительная функция
Младший школьный возраст (8–11 лет)		уровне, включая планирование, когда селекция схемы осуществляется по самому сильному средовому триггеру (то есть самому сильному стимулу), что создает условия для реализации хорошо знакомых и упроченных в опыте поведенческих актов и контроля системы внимания [Shallice, 1982; Norman, Shallice, 1986], когда механизм селекции ориентирован на сравнение изменяющихся условий для целенаправленного поведения. Способность решать задачи с 6 ходами и больше. <i>Исполнительный контроль:</i> развитие способности к корректировке действий с учетом обнаруженных ошибок
Подростковый возраст (12–15 лет)	Усвоение целостных систем теоретических понятий, излагаемых абстрактным языком, с использованием графиков, таблиц, моделей (усвоение разнообразных способов переработки учебной информации, отслеживание результатов усвоения). Формирование умения решать учебные задачи группой и в диалоге (управленческие действия), самостоятельная постановка учебных задач (организационные действия), умение аргументированно отстаивать свое понимание учебной задачи и способов ее решения	<i>Рабочая память:</i> длительное удержание стимула и его сопоставление с текущей информацией на фоне продолжающейся обработки информации, что уменьшает объем информации и ограничивает функциональные возможности в усвоении учебного материала. <i>Система внимания:</i> возрастная дефицитарность произвольного внимания, связанная с половым созреванием. <i>Исполнительный контроль:</i> совершенствование ингибиторного контроля, формирование регуляции когнитивных и эмоциональных процессов, корректировка стратегий поведения, контроль действий, связанный с обновлением информации в рабочей памяти
Старший школьный возраст и юность (16–25 лет)	Формирование учебных стратегий в условиях проектной деятельности и многозадачности: когнитивных (стратегии повторения, разработки понятий, трансформации учебного материала) и метакогнитивных (планирования, наблюдения, управления/регуляции) стратегий	Исполнительная система в целом — стратегическое принятие решений. <i>Исполнительный контроль:</i> обдумывание, контроль поведения в затруднительных ситуациях, прогнозирование / предвосхищение своего поведения. <i>Рабочая память:</i> зрелый уровень организации проявляется в увеличении латентного периода, связанного с событием, что обеспечивает возможность полноценного планирования, формирования внутреннего плана действий. <i>Произвольное поведение:</i> способность учиться на своих ошибках и опыте, контролировать рассогласование в действиях (мониторинг действий)

Итак, исполнительный контроль начинает полноценно функционировать только к концу юности [Gogtay, Giedd, Lusk et al., 2004]. Благодаря ему человек оказывается способен учиться на своих ошибках и опыте, контролировать просчеты. Так, приступая к большому проекту, студент с высоким уровнем зрелости структур префронтальной коры и их активной вовлеченностью в решение учебных задач будет способен заранее рассчитать время, выделить период для исследовательской работы, оставить время для проверки и контроля. Студент с пониженной функцией префронтальной коры не принимает во внимание прошлые неудачи, не способен учиться на прошлых ошибках и если в предыдущий раз откладывал подготовку на последний момент и неудачно сдал экзамен, то с высокой долей вероятности повторит ту же ошибку. Его действия основаны не на полученном опыте, а на том, что ему хочется в данный момент.

Гетерохронность формирования исполнительных функций определяется тем, что зоны префронтальной коры также созревают не одновременно. Ингибиторный контроль, отвечающий за подавление или торможение импульсов, связан, в частности, с вентролатеральной префронтальной корой [Bunge, Zelazo, 2006; Levy, Vagner, 2011], дорсолатеральной префронтальной корой [Modeling, 2013], нижней медиальной фронтальной корой [Royall, Lauterbach, Cummings et al., 2002] и премоторным отделом [Munakata, Herd, Chatham et al., 2011]. Комплексность его обеспечения позволяет понять, почему в шестилетнем возрасте школьники оказываются способны к произвольному поведению лишь частично: не все зоны находятся на одном и том же уровне функциональной готовности, требуется их синхронизация при образовании нейронного ансамбля, отвечающего за произвольность поведения.

Орбитофронтальная кора, которая находится строго за глазами яблоками, также участвует в процессе принятия решения, особенно если предполагается вознаграждение (например, классический marshmallow test<sup>5</sup> (выбор между одним небольшим вознаграждением немедленно и увеличением награды вдвое, если ребенок сможет подождать в течение короткого времени, примерно 15 минут) [Mischel, Ebbesen, Zeiss, 1972; Mischel, 1989; Zelazo, Carlson, Kesek, 2008]. С помощью ПЭТ-сканирования было выявлено, что при высоком уровне ингибиторного контроля (способности к торможению импульсного поведения) активируется правая орбитофронтальная извилина [Collete, van der Linden, Laureys et al., 2005]. Для маленьких детей, у которых эта зона находится еще в стадии созревания, такой самоконтроль представляет наибольшую трудность, им сложно противостоять эмоциональному побуждению, даже когда они знают правила и понимают их. Например, детям в возрасте 3 лет, уча-

---

<sup>5</sup> Маршмелоу тест (Стенфордский эксперимент с зефиром) — серия исследований отсроченного удовольствия, проведенная в конце 1960-х и начале 1970-х годов под руководством психолога Уолтера Мишела.

ствующим в эксперименте, трудно удержаться и не взять конфету даже в том случае, когда экспериментатор обещает им в награду конфету побольше или несколько конфет, при условии что они в течение некоторого времени не возьмут конфету, которая лежит перед ними. Тем не менее когда ребенок остается наедине с конфетой, эмоциональное побуждение взять конфету берет верх над знанием того, что лучше подождать для получения большего вознаграждения [Prencipe, Zelazo, 2005]. У детей 4 лет изменение мозговых волн наблюдается по всей области лобных долей, когда они пытаются удержаться, чтобы не схватить конфету. Это может говорить о том, что для противостояния побуждению требуется вовлечение максимального количества зон мозга префронтальной коры. У взрослых в аналогичной ситуации изменение мозговой волны происходит более локально и задействует меньшие области. То есть мозг в процессе развития становится более эффективным в проявлении самоконтроля [Rueda, Rothbart, McCandless et al., 2005].

Лонгитюдные исследования показывают, что способность откладывать вознаграждение в возрасте 4 лет положительно коррелирует с самоконтролем, связанным с рабочей памятью у тех же испытуемых, через 40 лет. При выполнении заданий на рабочую память у испытуемых с низким уровнем самоконтроля задействуется более широкая нейронная сеть, если сравнивать их с испытуемыми, имеющими высокий уровень самоконтроля; первым требуется больше времени для решения заданий, они выполняют задания с меньшей точностью. Выборка лиц с высоким уровнем самоконтроля более гомогенна по нейронному ансамблю в отличие от группы с более низкой способностью к самоконтролю. Эти нейронные ансамбли становятся основанием для утверждения, что можно предсказать уровень самоконтроля человека по его способности откладывать вознаграждение с точностью 71 %. Таким образом, авторы исследования утверждают, что нейронные ансамбли являются биологическими предикторами способности к самоконтролю [Bergman, Andersson, Becher et al., 2013].

Ключевую роль в установлении баланса между логическими мыслями и эмоциональными побуждениями играет передняя часть поясной извилины коры головного мозга [Tarullo, Obradovic, Gunnar, 2009]. Она представляет собой прослойку между префронтальной корой и зонами, находящимися в глубине мозга и вовлеченными в эмоциональные реакции. Передняя часть поясной извилины получает информацию из многих зон головного мозга и интегрирует эту информацию для регуляции когнитивных и эмоциональных процессов [Zelazo, Carlson, Kesek, 2008]. Эта зона участвует в оперативном контроле поведения в затруднительных ситуациях и корректировке стратегии поведения при необходимости [Luu, Tucker, 2004; Royall, Lauterbach, Cummings et al., 2002]. Верхняя передняя часть поясной извилины, получающая информацию из префронтальной коры, становится более активной в возрасте от 3 до

6 лет, когда ребенок научается ожидать вознаграждения и подавлять импульсивное поведение [Posner, Rothbart, 2000].

Процессы когнитивного переключения были обнаружены в правой и левой дорсолатеральных фронтальных зонах и верхней медиальной фронтальной зоне [Royall, Lauterbach, Cummings et al., 2002], в теменной доле и левой средней и нижней лобных извилинах [Collette, van der Linden, Laureys et al., 2005]. Авторы предполагают, что лобные доли отвечают за стратегическое принятие решений и имеют индивидуальные различия, в то время как теменные доли вовлечены скорее в базовые процессы внимания, необходимые для выполнения заданий, требующих участия исполнительных функций. Левая и правая нижние лобные извилины, верхняя лобная извилина вовлечены в процессы самоконтроля, связанные с постоянным обновлением информации в рабочей памяти [Wager, Smith, 2003].

### **3.4.6. Среда и социальное окружение как факторы становления исполнительной системы**

Способность человека ставить перед собой цели и добиваться их не столько определяется общественными условностями или культурным багажом, сколько заложена в структуру префронтальной коры и ее связей [The Neuropsychiatry, 1995, p. 153]. Исследование, направленное на изучение ингибиторного контроля (торможения импульсов) с помощью ЭЭГ, выявило, что высокий уровень торможения импульсных ответов (задания Go/No-Go) предсказывает успешность самоконтроля в социальном контексте (игра на доверие) [Nash, Hulme, Gooch et al., 2013].

Тем не менее некоторые авторы считают, что чуткое и поддерживающее самостоятельность поведение родителей способствует развитию стратегий исполнительного контроля у детей [Calkins, Johnson, 1998; Bernier, Carlson, Whipple, 2010]. В частности, в приемных семьях была выявлена сильная взаимосвязь между стилем материнского воспитания, академической успеваемостью и способностью к ингибиторному контролю [Pears, Fisher, Bruce et al., 2010]. Таким образом, влияние семейного окружения, доступные ребенку физические и социальные ресурсы в семье способствуют более высокому уровню развития контролирующей функции у детей в возрасте до 5 лет [Early Child, 2005].

В двуязычных семьях дети также имеют более высокий уровень самоконтроля [Bialystok, Martin, 2004]. Переключение с одного языка на другой развивает гибкость мышления и способность к переключению внимания [Zelazo, Carlson, Kesek, 2008]. Приведенные факты показывают, как развивающиеся зоны мозга, отвечающие за исполнительный контроль, могут по-разному формироваться под влиянием опыта ребенка.



В ряде исследований было установлено влияние макросоциального фактора. Так, корейские и китайские дети, находящиеся в высокоструктурированных условиях (в семьях с жестко заданной иерархией), демонстрируют более высокие показатели по результатам заданий на когнитивный контроль, чем их американские сверстники [Sabbagh, Xu, Carlson et al., 2006]. Это определенным образом свидетельствует о роли окружения с высоким уровнем организации и нормативности, оно способствует более быстрому созреванию мозговых структур, отвечающих за контроль. Ценность данного феномена в культуре также может влиять на его развитие у представителей этой культуры.

Исследования динамики развития исполнительной системы позволяют понять принципы формирования универсальных учебных действий и разработать рекомендации, как создать оптимальные условия для реализации исполнительных функций в учебной деятельности.

Сегодня можно с уверенностью утверждать, за счет каких нейрофизиологических механизмов эффективно реализуется теория поэтапного формирования умственных действий П. Я. Гальперина. Ее можно рассматривать как технологию развития универсальных учебных действий, если речь идет об освоении разного рода способов оперирования учебным материалом, в широком контексте — о формировании учебных стратегий и профессиональных умений в определенной области знания в высшей школе. Все шесть этапов, обоснованных П. Я. Гальпериным с позиции психологии, могут быть рассмотрены в нейрофизиологическом аспекте.

**Мотивационный этап** предполагает наличие познавательного интереса, благодаря которому активизируется умственная работоспособность обучающегося, он быстро включается в деятельность, которую осваивает. Вспомним, что в общей системе исполнительных функций вентральная часть передней поясной извилины, отвечающая за мониторинг эмоций и аффективных состояний, обладает широкими реципроктными связями с латеральной, передней и медиальными зонами префронтальной коры, вовлекаемыми в обеспечение когнитивных функций, что сказывается на продуктивности умственной деятельности.

**Ориентировочный этап** включает в себя ознакомление с тем, что подлежит освоению, составление схемы ориентировочной основы будущего умения. Как известно, моторная часть передней поясной извилины имеет «входные» и «выходные» связи с областями коры, ответственными за хранение точно планируемых действий. Ориентировочная основа предлагает последовательность действий и операций, которые должны быть усвоены, а до этого момента позволяет многократно ее повторять, опираясь на внешнее регулирование, вовлечение процессов рабочей памяти. На языке нейрофизиологии овладение новым действием может быть обозначено как формирование «карты» действий на уровне стриатума. Именно от типа ориентировочной основы,

выступающей внешней картой нового действия, которое требуется усвоить, зависят процессы мониторинга действий. Функциональная роль когнитивной части передней поясной извилины — оценка и сравнение текущих действий и их результата и активизация исполнительного контроля, если имеет место рассогласование между ними. Таким образом, чем полнее и конкретнее ориентировочная основа, тем понятнее для обучающегося модель действия и легче реализация исполнительной функции мониторинга действий, когда сличение может быть осуществлено пошагово. С этой точки зрения именно *второй тип* ориентировочной основы создает все условия для легкого и безошибочного формирования «карты» действий. Она содержит в готовом виде полную программу последовательных операций (алгоритм) в конкретной форме и иллюстрирует его применение на примере частного случая.

*Первый тип* ориентировочной основы (характерна низкая обобщенность, отсутствие круга представлений об изучаемом явлении, конкретность ориентиров, демонстрация лишь конечного результата и образца) создает ситуацию, в которой обучающемуся необходимо самостоятельно выделять ориентиры путем проб и ошибок. Поскольку полноценная «карта» действий отсутствует, формирование действия идет медленно и с большим количеством ошибок. Малейшее изменение внешних условий негативно влияет на выполнение действий, так как реализация исполнительного контроля затруднена (когнитивный механизм оценки качества исполняемого действия не может быть реализован в полном объеме).

*Третий тип* ориентировочной основы, который отличается от первого типа полнотой, а от второго типа — обобщенностью (отражает характеристики целого класса явлений), предлагает не конкретный операциональный план выполнения действия, а общий метод для каждого конкретного случая. Формирование идет более сложно (за счет сворачивания отдельных деталей), но результат обладает большой устойчивостью и широтой переноса (может быть перенесен в самые разные ситуации, в том числе неочевидным образом связанные с выработанным алгоритмом действий) в новые условия.

**Материальный этап** — практическое выполнение осваиваемого действия, под контролем преподавателя.

**Внешнеречевой этап** — самостоятельное выполнение действия с полным комментированием, либо в устной, либо письменной форме, а также только во внешнеречевой форме, без практического выполнения.

**Этап безвучной устной речи (про себя)** — самостоятельное выполнение действий с проговариванием про себя (во внутреннем плане).

**Внутриречевое действие** — комментарий выполнения действия максимально сокращается.

Формирование нового действия — длительный процесс, так как требует образования множественных ассоциативных связей между контекстом и ос-

ваиваемым действием. Соответственно, последние четыре этапа фактически способствуют перестройке имеющихся карт действий, вовлечению систем кодирования информации (на уровне действия, образа, слова) и консолидации событий (укрепление следа в памяти за счет многообразия учебных заданий и учебных ситуаций, предлагаемых учителем, чтобы учащиеся освоили действие). Таким образом, происходит обобщение действия посредством замены конкретных объектов их словесным описанием. Обобщение обеспечивают сенсомоторное сопряжение, организация многократного повторения последовательности операций с использованием эмоциональных стимулов в качестве подкрепления, моторное планирование и когнитивный контроль действия. На основе предложенных П. Я. Гальпериным этапов создается сложный нейрональный ансамбль систем внимания, памяти и исполнительных функций. При этом исполнительный контроль поддерживается на материальном этапе внешним контролем со стороны преподавателя (следит за правильностью выполнения каждой операции, входящей в состав действия), возможностью вернуться к предыдущему этапу и развернуть любую операциональную часть осваиваемого действия, если возникнут затруднения или обнаружится рассогласование между ожидаемым и текущим результатами действия (возникновение ошибки). От этапа к этапу происходит «сворачивание» умственного действия. Со временем действие перестает требовать высокого уровня когнитивного контроля, выполняется быстрее и с меньшими энергетическими затратами.

Теория поэтапного формирования умственных действий является ярким примером того, как работают информационные и исполнительные системы мозга в процессе полного обоснования своих действий, осознания операций, развернутого рассуждения. В эксперименте О. А. Чувгуновой показано, что при решении сложных задач на планирование был выявлен ряд различий в работе левого и правого полушарий на всех этапах выполнения задания. Например, при повторном решении задач в правом полушарии активность снижалась как в высокочастотном, так и в низкочастотном диапазоне, а в левом полушарии повышалась бета-активность. Это может рассматриваться как проявление алгоритмизации усвоенного ранее способа действия по решению сложных задач на формирование внутреннего плана действий.

Знание нейрофизиологических основ когнитивной деятельности позволяет понять механизмы работы образовательных технологий, которые используются в учебном процессе, оптимизировать процесс обучения. В частности, опираясь на полученные данные, можно предложить следующие методические рекомендации.

- Для обеспечения максимально эффективного усвоения нового учебного действия важно знать, сколько времени требуется на различные этапы учебного занятия и какое количество упражнений необходимо

для стойкого формирования действия. Согласно результатам исследования внутреннего плана действия О. А. Чувгуновой, необходимо учитывать степень сложности плана. Так, при работе с простыми задачами способ действия формировался достаточно быстро, и еще на этапе тренировки участники демонстрировали высокий результат. На этапе повторного предъявления результативность немного снизилась, несколько повысилась нагрузка на рабочую память. Возможно, утомление выразилось в снижении когнитивного контроля при однообразной работе. Допустим, в случае формирования учебного действия при решении простых заданий достаточно решения тренировочных задания для дальнейшего перехода к заданиям, где нужно выполнить это учебное действие в новых условиях. При выполнении более сложных заданий на этапе закрепления успешность решения оказалась немного более высокой, а энергетические затраты мозга снизились. Вероятно, это способствовало «сворачиванию» умственного действия и его частичной автоматизации. Данный факт позволяет говорить о целесообразности этапа закрепления в виде повторного решения аналогичных заданий в другом порядке предъявления (например, в рандомизированном) при решении задач на планирование с большим количеством шагов.

- Если в зависимости от сложности задания (внутреннего плана действий) рабочая память вовлекается в большей мере, в образовательный процесс нужно включить разнообразные задания для ее тренировки. В ситуации постоянного усложнения учебных задач от класса к классу структуры мозга, отвечающие за их реализацию, могут оказаться функционально не готовы. Кроме того, следует поддерживать оптимальное функциональное состояние учащихся, не допуская когнитивной перегрузки, особенно при работе со сложными поисковыми заданиями.
- Отсроченный эффект формирования сложных умственных действий ориентирует учителя на то, чтобы избегать ситуации, когда в течение одного занятия происходит знакомство с планом действия (алгоритмом, схемой), овладение новым способом действия, закрепление и выполнение в новых условиях. Наличие этапа тренировки не гарантирует быстрого и полного нейрофизиологического картирования, нагрузка на рабочую память усиливается. В этом плане целесообразнее провести отдельно этап знакомства и тренировки и этап контроля и оценки успешности решения задачи на основе нового плана (способа) действий. Контроль и оценку степени сформированности внутреннего плана действий лучше провести после перерыва или отдыха. Тогда появится время для сохранения «следов» в памяти, а эффект интерференции

будет исключен. Разделение этапов по дням (знакомство с материалом и тренировка в один день, а проверка и оценка — в другой) создаст условия для процессов консолидации, укрепляющих «следы» в памяти и интегрирующих изученное содержание.

- Данные метаанализа 198 независимых исследований свидетельствуют о том, что эффективность выполнения заданий на самоконтроль снижается, когда им предшествуют другие задания, требующие самоконтроля [Hagger, Wood, Stiff et al., 2010]. Таким образом, следует чередовать выполнение заданий и их проверку. Если проводится полная проверка после выполнения всех заданий, эффективность контроля последних будет снижена. Аналогичным образом после заданий, требующих вовлечения исполнительного контроля (ингибиторного или когнитивного), целесообразно включать функционально иные задания, например продуктивного типа (творческие, проблемные, на воображение, сочинение и т. д.), или наоборот — сначала задания продуктивного типа, потом контролирующие задания.
- Когда ситуация хорошо знакома учащимся, они достаточно хорошо изучили тему, не наблюдается различий между двумя типами учебного контроля «поиск ошибки» и «поиск верного ответа». Соответственно, использование инструкции «найди верный ответ» или «найди ошибку» для проверки знаний не будет оказывать значимого влияния на результаты выполнения заданий. Однако инструкция «найди верный ответ» для математических заданий потребует более высокой концентрации внимания, и действие в соответствии с ней предположительно будет более продуктивным. При контроле сложного учебного материала релевантной скорее окажется установочная инструкция «найди верный ответ», поскольку при учебном контроле такого типа мозг быстрее опознает девиантный стимул (ошибку).
- При контроле выполнения лингвистическое задание сопровождается процессами семантической обработки информации, общей согласованностью ответа с хранящейся в памяти информацией [Coulson, Federmeier, van Petten et al., 2005; Friedrich, Friederici, 2006; Kutas, Federmeier, 2000; Perrin, Garcia Larrea, 2003; Vasisht, Brüssow, Lewis et al., 2008], в этом состоит отличие от математического задания. По нейрональной динамике исполнительный контроль отличается от контроля математического материала, требует большего времени на актуализацию правил, унификацию (соотнесение) ранее изученного и текущего материала.
- В образовательном процессе должно быть уделено особое внимание развитию исполнительных функций, учитывая их сложный характер. Только в этом случае можно говорить о создании условий для

формирования универсальных учебных действий. В настоящее время в западной литературе можно встретить специальные программы обучения самоконтролю в школе и дома, например экологический подход к обучению мозга [Bryck, Fisher, 2012], описание разнообразных мероприятий, нацеленных на развитие различных аспектов домена исполнительных функций, включая рабочую память и внимание, с помощью методик обучения регулированию эмоций и поведения [Diamond, Barnett, Thomas et al., 2007; Raver, Jones, Li-Grining et al., 2008; Raver, Blair, Willoughby, 2013]. Результаты подобных программ связаны с увеличением способности к ингибиторному контролю, а в дальнейшей перспективе — с академической успеваемостью [Diamond, Barnett, Thomas et al., 2007; Tominey, McClelland, 2011]. Несмотря на то что эти программы приводят к желаемым результатам, доказательства генерализации этих результатов между доменами исполнительного контроля пока ограничены [Diamond, Lee, 2011].

Говоря о результатах нейрофизиологических исследований исполнительной системы мозга, можно сделать вывод, что на нейрональном уровне ключевые универсальные действия (обработка учебного материала, планирование и контроль) обеспечиваются исполнительными функциями и протекают как частично независимые процессы. Результаты ЭЭГ фиксируют активное вовлечение процессов внимания (по-разному представлено предвнимание (компонента P3a) и операции вовлечения, процессы произвольного внимания и активации рабочей памяти (компонента P3b)), процессы семантической обработки, свидетельствующие о протекании осознания и понимания (компонента N400). Для действия контроля дополнительно фиксируются ранние ВП, связанные с распознаванием девиантного стимула (компонента N200) и поздние ВП, связанные с операциями мониторинга (компонента P400). При этом для каждого сложного умственного учебного действия характерна своя специфика динамики биоэлектрической активности головного мозга, обусловленная содержанием учебной задачи и способом ее решения (типом учебного действия), влияющая на продуктивность.

### Контрольные вопросы и задания

1. В чем проявляется специфика восприятия учебной информации у студентов-первокурсников и выпускников? Объясните свой ответ с нейрофизиологической точки зрения.
2. Какие приемы поддержания умственной активности с опорой на закономерности работы мозга вы используете (считаете первоочередными для использования) в своей работе? Обоснуйте свой ответ.

3. Ознакомьтесь с таблицей, где раскрыты основные функции и психологические основания традиционной системы обучения (информационно-сообщающей). Что отсутствует в этой схеме? Измените эту таблицу таким образом, чтобы отразить в ней имеющиеся в литературе данные о нейрофизиологических основаниях процессов познания (когнитивных и исполнительных функций). Как эти факты, относящиеся к системе формирования знаний и умений, могут быть использованы в образовании? Предложите упражнения, которые могут быть использованы в учебном процессе для развития зон мозга, обеспечивающих работу систем внимания, восприятия, памяти.

Функция		Психологический процесс	Принцип
преподавателя	обучающегося		
Предъявление информации	Восприятие и запоминание	Внимание, восприятие, память	Наглядность, переход от простого к сложному, последовательность, систематичность, аксиомы «повторение — мать учения», «новое — хорошо забытое старое»
Закрепление информации	Повторение обработка	Внимание, память, движение	Наглядность, переход от простого к сложному, последовательность, систематичность, аксиомы «повторение — мать учения», «новое — хорошо забытое старое»
Контроль	Актуализация усвоенного, противоречия	Внимание, память, движение	Наглядность, переход от простого к сложному, последовательность, систематичность, аксиомы «повторение — мать учения», «новое — хорошо забытое старое»

4. Разработайте программу из пяти заданий по развитию исполнительных функций (или какой-либо из исполнительных функций) для одной из трех возрастных групп (младший школьник, подросток, старшеклассник), вовлеченных в управление учебной деятельностью.

### Использованная литература

1. *Асмолов А. Г., Бурменская Г. В., Володарская И. А. и др.* Как проектировать универсальные учебные действия в начальной школе: от действия к мысли: пособие для учителя / Под ред. А. Г. Асмолова. М.: Просвещение, 2008. 151 с.
2. *Кропотов Ю. Д.* Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк: Заславский А. Ю., 2010. 512 с.
3. *Diamond A.* Executive functions // *Annual Review of Psychology*. 2013. Vol. 64. P. 135–168.
4. *Наатанен Р.* Внимание и функции мозга. М.: МГУ, 1998. 560 с.
5. *Miyake A., Friedman N. P., Emerson M. J. et al.* Unity and diversity of executive functions and their contribution to complex 'frontal lobe' tasks. A latent variable analysis // *Cognitive Psychology*. 2000. Vol. 41. P. 49–100.

## Глава 4

# Нейрофизиологические основы обучения чтению, математике, родному и иностранному языкам

Существуют общие нейрофизиологические механизмы, обеспечивающие когнитивную и метакогнитивную деятельность человека в процессе познания, но усвоение разного предметного содержания (счет, письмо, иностранная речь и т. д.) имеет свою специфику [Reading, Writing, 2012]. Различия на уровне дидактических систем отражены в разных подходах к преподаванию, например, русского языка и математики. Однако сегодня можно говорить о том, что эти различия имеют нейрофизиологическое обоснование и формирование сложных умственных действий (чтение, каллиграфия, решение задач) обеспечивается нейрональными ансамблями в зависимости от типа навыка/содержания действия и традиций (например, языковой системы — транспарентной, как итальянский язык, или нетранспарентной, как английский или русский языки, социального контекста, условий жизнедеятельности и т. д.).

Благодаря методам нейровизуализации (МРТ и ПЭТ) сегодня имеются довольно четкие представления о структуре, развитии и функционировании человеческого мозга. Наблюдая за его деятельностью в различных условиях, ученые выявляют факторы, которые могут повлиять на обучение. Таким образом формируется понимание, как биологические факторы, которые мы не в состоянии изменить (половые различия в структуре мозга, гормональный статус и др.), оказывают влияние на наши способности и обучаемость, появление трудностей в обучении и проблем с концентрацией внимания или произвольной саморегуляцией учебной деятельности.

### 4.1. Нейрофизиологические механизмы освоения родного и иностранного языков

Речь имеет рефлекторный характер. Первосигнальные компоненты всегда включаются в речевой процесс в виде звучания (устная речь), оптических моментов (зрительная речь) и т. д. На уровне мозга речь обеспечивают второсигнальные связи. При этом речь каждого человека своеобразна, что объясняется воздействием социальных и культурологических факторов.



Слово воспринимается человеком не только как отдельный звук или сумма звуков, а как определенный концепт, имеющий образный конструкт — фонетическую или визуальную словоформу — и смысловое значение. Так, если на какое-то слово был выработан условный рефлекс, то слово-синоним тоже вызывает условно-рефлекторную реакцию. Аналогичное явление отмечается при восприятии слова, служившего условным раздражителем, на родном языке по отношению к тому же по смыслу на иностранном языке, который человек знает (учит). Существенно важно, что «нейтральные» слова, то есть те, на которые не был образован условный рефлекс, не вызывают реакции. Например, при условном рефлексе на слово «дом» близкое по звучанию слово «дым» вызывает рефлекс только первое время. Очень быстро образуется дифференцировка таких слов, и они перестают вызывать отклик. В процессе обучения между различными участками коры мозга и центрами, принимающими участие в актах чтения и письма, также образуются связи (между визуальной и фонологической словоформами). Именно поэтому после выработки ассоциации (временной связи — условного рефлекса) на звук звонка надпись «звонок» вызывает у человека условно-рефлекторную реакцию [Бабский, Зубков, Косицкий и др., 1966].

В опытах на человеке речевые сигналы с успехом могут быть применены как подкрепление условного раздражителя. Для этой цели условный раздражитель, например звук звонка, сопровождается словесной инструкцией: «нажмите на ключ», «встаньте», «отдерните руку» и т. п. В результате ряда сочетаний условного раздражителя со словесной инструкцией образуется (в данном примере — на звук звонка) условный рефлекс, характер которого соответствует инструкции. У человека восприятие, представления и большая часть ощущений словесно обозначаются. Слово является мощным подкреплением, на его базе могут быть образованы прочные условные рефлексы. Первая и вторая сигнальные системы неотделимы друг от друга. Возбуждения первой сигнальной системы, вызываемые конкретными сигналами от предметов и явлений окружающего мира, передаются во вторую сигнальную систему. Обособленное функционирование первой сигнальной системы без участия второй (за исключением случаев патологии) возможно только у ребенка, который еще не овладел речью [Бабский, Зубков, Косицкий и др., 1966].

Условные рефлексы на словесные раздражители появляются во второй половине первого года жизни ребенка. При общении с ребенком взрослые обычно произносят слова в комплексе с другими непосредственными раздражителями (зрительными, слуховыми, тактильными и т. д.). Показ предмета и его называние постепенно приводят к формированию ассоциативной связи. Ребенок реагирует на слова только в сочетании с другими раздражителями (знакомое лицо, голос, привычная обстановка, поза говорящего и т. п.). При изменении даже одной составляющей комплекса реакция на слово исчезает. Постепенно

слово приобретает основное значение, а другие компоненты комплекса вытесняются. Вначале выпадает кинестетический компонент, затем зрительные и звуковые. После этого уже само слово вызывает реакцию [Данилова, 2004].

К концу первого года слово начинает заменять обозначаемый им предмет. Однако на этом этапе слово замещает лишь конкретный предмет, например данную куклу, а не куклу вообще, то есть слово является интегратором первого порядка. Превращение слова в интегратор третьего порядка, или «сигнал сигналов», происходит в конце второго года жизни. Для этого необходим достаточный опыт изучения окружающей среды и система ассоциативных взаимосвязей. При благополучном переходе на этот этап ребенок может оперировать различными предметами, обозначаемыми одним словом [Данилова, 2004].

В возрасте 3–4 лет формируются понятия — интеграторы третьего порядка. Ребенок понимает такие слова, как «цветы», «животные», «игрушка». К пятому году жизни понятия усложняются. Например, ребенок использует слово «вещь» по отношению к игрушкам, посуде, мебели и т. д.

В процессе онтогенеза взаимодействие двух сигнальных систем проходит ряд стадий. Первоначально условные рефлексy ребенка формируются на уровне первой сигнальной системы, то есть на уровне «непосредственный раздражитель — непосредственная (двигательная, вегетативная) реакция». Во втором полугодии появляется реакция на словесные раздражители в виде двигательных и вегетативных реакций («словесный раздражитель — непосредственная реакция»). Около 8 месяцев ребенок начинает подражать речи взрослых, используя различные звуки для обозначения предметов, происходящих событий, своего состояния. Позже ребенок начинает произносить отдельные слова, которые вначале связаны с каким-то предметом. В 1,5–2,0 года одно слово часто обозначает не только предмет, но и связанные с ним действия и чувства. Появляются связи типа «непосредственный раздражитель — словесная реакция». На втором году жизни словарный запас составляет 200 слов и более, ребенок может строить простые предложения. К концу третьего года словарный запас составляет до 500–700 слов. Появляются связи типа «словесный раздражитель — словесная реакция», что позволяет коммуницировать в речевой форме со взрослыми и сверстниками [Данилова, 2004].

С развитием речи в возрасте 2–3 лет усложняется интегративная деятельность мозга. Появляются ассоциативные связи между цветом предметов, весом, величиной, расстоянием. В 3–4 года вырабатываются двигательные и некоторые речевые стереотипы.

В восприятии речи можно выделить два уровня: анализ и синтез звуков; понимание речи, или анализ и синтез сигнальных, смысловых характеристик речи.

**Фонема** — то общее, что человек слышит всякий раз, когда произносится какой-нибудь звук речи данного языка. Фонеме соответствуют определенные

области частот в акустическом спектре звуков речи, называемые **формантами** речевого звука. Форманты отличаются друг от друга частотой и амплитудой колебаний, что создает специфический тембр, благодаря которому один звук отличается от другого. Каждый звук имеет от двух до четырех формант. **Фонематический слух** — способность анализировать и синтезировать речевые звуки по тем постоянным признакам, которые свойственны фонемам данного языка. В обычных условиях овладения родным языком фонематический слух развивается в возрасте от 1 до 3–4 лет. Слово, как звуковой сигнал, не есть простая сумма фонем. За счет разнообразного соединения звуков и акустических переходов между ними слово всегда представляет собой целостный звуковой комплекс — фонематическую словоформу. Различие значений, сходных по звучанию слов, происходит при соотнесении слова с контекстом, в который оно включено, с учетом речевых интонаций (логических ударений, порядка слов и т. д.). Сигнальная функция речи (ее понимание) реализуется лишь при условии образования в предшествующем опыте соответствующих сигнальных нервных связей [Гамезо, Домашенко, 2001].

Овладение родным (первым, основным) языком происходит снизу вверх — от слогообразования и других элементарных механизмов к высшим уровням языка и лишь затем к произвольности, к сознательному оперированию знаковыми единицами. Овладение в раннем возрасте двумя языками одновременно (билингвизм), например в двуязычных семьях, происходит без каких-либо дополнительных затруднений. Овладение же вторым языком в более поздний период, после овладения родным, происходит сверху вниз: начиная с сознательных операций над языком через произвольный выбор языковых средств к автоматизации речи [Гамезо, Домашенко, 2001]. При овладении вторым языком развитие фонематического слуха требует длительных упражнений. Человеку легче овладеть тем иностранным языком, который находится в одной языковой группе с его родным языком. Например, человеку, говорящему по-французски, легче овладеть вторым языком из романской группы (итальянским, испанским), чем англичанину [Годфруа, 1996].

В развитии речевой функции можно выделить несколько критических периодов, которые имеют место в том или ином возрасте. Так, различение фонем родного языка складывается к концу первого года жизни. Пик же развития синтаксической функции приходится на период с 18 до 36 месяцев. Резкое увеличение словарного запаса наблюдается около 1,5–2,0 лет. Однако способность обогащать свой словарный запас сохраняется и далее, как в детстве, так во взрослом возрасте [Kuhl, 2010].

Парадоксально, что младенцы несравнимо более успешны в усвоении языка или нескольких языков в случае билингвизма, чем взрослые люди, многократно превосходящие младенцев по уровню когнитивного развития. Поэтому для раскрытия нейрофизиологических механизмов становления рече-

вой функции важны исследования детей младенческого и раннего возраста. Современные методы нейровизуализации и электроэнцефалографии позволяют получить объективные данные о работе мозга при восприятии речевых стимулов детьми первых лет жизни, даже если они еще и не умеют говорить. Так, ЭЭГ у детей в возрасте от 6 до 12 месяцев (использовался метод ВП) показали, что нарастают различия при восприятии фонем, свойственных и не свойственных родному языку. Если в возрасте 6 месяцев различий в реакции мозга на фонемы родного и неродного языка еще нет, то с 6 до 12 месяцев различия нарастают и к году выражены значительно. При этом снижение способности воспринимать фонемы неродного языка сопровождается быстрым прогрессом в освоении родного языка. Данные лонгитюдных исследований позволяют сделать вывод о том, что способность воспринимать фонемы родного языка в возрасте до 1 года является предиктором успешности дальнейшего речевого развития. Так, детям в возрасте 7 месяцев предъявляли стимульный материал, содержащий фонемы, присущие родному языку, и фонемы, не свойственные родному языку. При этом использовали парадигму негативности рассогласования и обработку методом ВП. Затем у тех же детей было проведено исследование речевой функции в возрасте 13, 16 и 24 месяцев. Те дети, которые в 6 месяцев проявили лучшее фонематическое восприятие родной речи и плохое восприятие чужого языка, далее демонстрировали более высокий уровень речевого развития.

Нейронная сеть, обеспечивающая речевые функции, имеет сложное строение. В работе [Kim, Relkin, Lee et al., 1997] рассматривают речемоторную область Брока как структуру, участвующую в процессе обработки фонетических структур разных языков. Данные функциональной МРТ, полученные при выполнении различных языковых заданий, показали активацию левых фронтальных, височных и теменных областей в ответ на фонетическую, семантическую и синтаксическую обработку [Cohen, Lehericy, Chochon et al., 2002; Vigneau, Beaucousin, Herve et al., 2006; Suchan, Karnath, 2011]. Обзор 128 работ в этой области показал, что можно выделить 728 фокусов активности речевых процессов в левом полушарии (рис. 4.1, а) и 218 фокусов активности речевых процессов в правом полушарии (рис. 4.1, б) [Vigneau, Ecarnot, Rabatel et al., 2011].

С помощью методов нейровизуализации при выполнении задания на узнавание и называние предмета на картинке было обнаружено, что сначала происходит активация средней части левой височной средней извилины, доступ к фонологическому коду слова сопровождается активацией зоны Вернике, а разделение на слоги активировывает левые нижние фронтальные области [Indefrey, Levelt, 2004].

Существует теория, объясняющая усвоение грамматических структур родного языка их многократным повторением: ребенок постоянно слышит

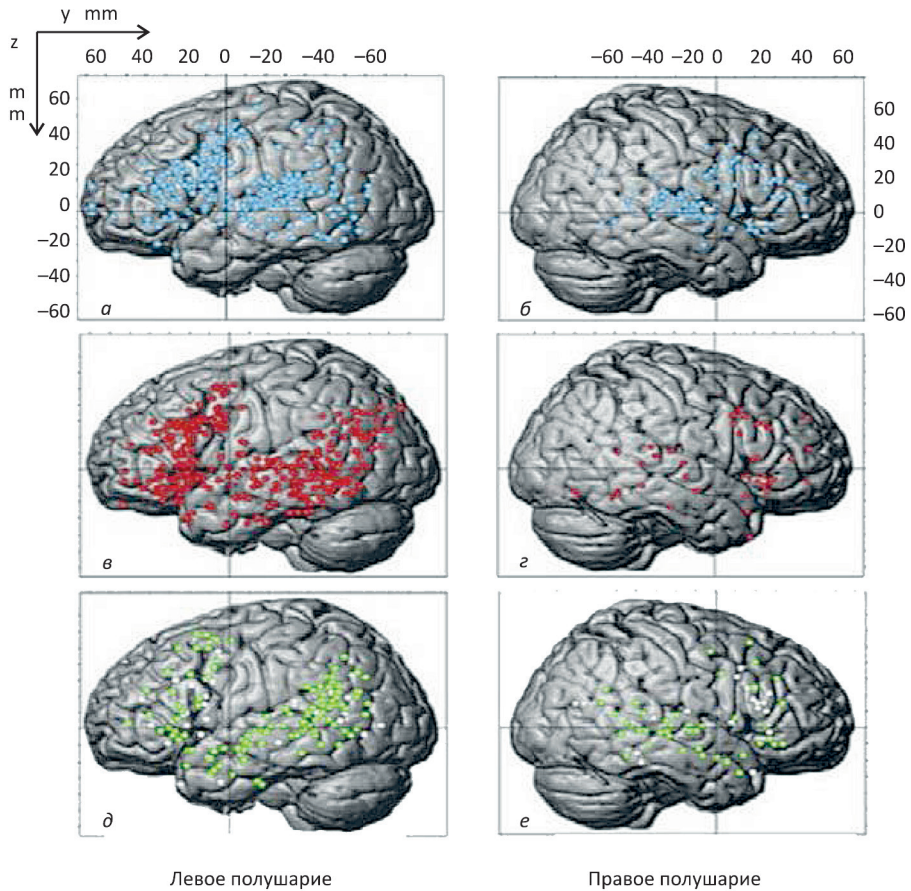


Рис. 4.1. Нейронная сеть, обеспечивающая речевые функции:  
*а, б* — обработка и генерация звуков речи (248 фокусов активности);  
*в, г* — семантика, значение слов и фраз (322 фокуса активности);  
*д, е* — смысл предложений и текста, синтаксис (161 фокус активности) [Vigneau, Ecarnot, Rabatel et al., 2011, p. 29]

их. Раскрыты механизмы пассивного усвоения в результате пассивного восприятия [Rodriguez-Fornells, van der Lugt, Rotte, 2005]. При речепродукции на самом раннем этапе происходит кодирование семантической информации, затем синтаксической и только потом фонетической. Эта точка зрения получила подтверждение в исследовании, когда группа детей в возрасте 9 месяцев из англоязычных семей регулярно слушала речь на китайском языке на протяжении 12 сессий, проведенных в течение 4–5 недель. Носители китайского языка читали вслух книги, манипулировали с игрушками и т. п. После этого было проведено исследование ЭЭГ со стимульным материалом на английском и китайском языке. Экспериментальная группа имела опыт восприятия китайской речи.

Контрольная группа слушала аналогичную информацию на английском языке. Анализ данных ЭЭГ показал, что восприятие китайского языка не прошло бесследно и дети из экспериментальной группы имеют более высокий уровень фонематического восприятия китайского языка, чем дети из контрольной группы. Однако в данном эксперименте дети имели непосредственный контакт с носителями языка и были вовлечены в социальное взаимодействие. Когда аналогичный эксперимент был организован с использованием аудиозаписи, телевизора, то есть не было контакта с человеком, дети, слушавшие китайскую речь, не продемонстрировали иного восприятия китайского языка по сравнению с детьми, не подвергавшимися такому воздействию. Таким образом, важным аспектом речевого развития является социальное взаимодействие [Костромина, 2007а, с. 781].

В других работах было показано, что время отсеивания слов второго языка и псевдослов у билингвов является одинаковым. Это свидетельствует о том, что люди, владеющие двумя языками, могут успешно и эффективно «включать» один из лексиконов в зависимости от ситуации [Rodriguez-Fornells, Rotte, Heinze et al., 2002]. Вместе с тем существует перекрытие нейрональных систем, обеспечивающих функционирование разных языков даже с абсолютно различной орфографией [Crinion, Turner, Grogan et al., 2006; Perani, Abutalebi, 2005]. То есть наложение нейросети, активированной при говорении на одном языке, будет частично совпадать с той, которая активируется, когда человек говорит на другом языке. Понимание механизмов речевого развития позволяет разработать более эффективные методики изучения иностранных языков в старшем возрасте [Kuhl, 2010].

Например, уже сегодня известно, что плохо успевающие по иностранному языку студенты отличаются менее высоким уровнем активации головного мозга. У них более выражены альфа-частоты, уровень когерентности биопотенциалов в этой частотной полосе, различия между характеристиками ЭЭГ в состоянии покоя с открытыми и закрытыми глазами незначительны [Хохлова, 2011]. В то же время у студентов с высокой академической успеваемостью по иностранному языку доминируют колебания в бета-диапазоне и наблюдается бóльшая выраженность реакции десинхронизации при открывании глаз, что является важным фактором, положительно влияющим на успешность выполнения когнитивных задач. Депрессия альфа-ритма может служить показателем активации внимания в связи с языковой обработкой [Pulvermüller, Lutzenberger, Preissl, 1999; Kim, Kim, 2006].

Установлено влияние первого языка на активацию при чтении слов второго языка [Nosarti, Mechelli, Green et al., 2010]. В работе исследовались показатели активации головного мозга в группе англоговорящих студентов, изучавших немецкий язык в течение 5 месяцев [Stein, Federspiel, Koenig et al., 2009]. МРТ-сканирование проводилось дважды: перед началом изучения языка и по-

сле него. Результаты показали, что в первой сессии слова чужого языка вызывали более сильную фронтальную активацию коры головного мозга, чем во второй. Авторы пришли к выводу, что на начальных этапах изучения необходим более жесткий контроль, то есть более значимая активация лобных областей мозга.

В последние десятилетия XX века были получены клинические данные, подтверждающие территориальное разделение зон, занимающихся обработкой разных частей речи [Pulvermüller, Lutzenberger, Preissl, 1999; Warrington, McCarthy, 1987]. Показано, что существительные и глаголы обрабатываются разными областями мозга в высокочастотном диапазоне 25–30 Гц: фронтальные области участвуют в обработке глаголов, височно-затылочные зоны — существительных. Объяснение такому разделению можно найти в модели Д. Хебба, согласно которой нейроны, разделенные пространственно, могут образовывать прочные функциональные ансамбли, активирующиеся на одной частоте, при этом области, явно не связанные с языком, могут активироваться совместно с классическими речевыми центрами [Hebb, 1949; Pulvermüller, 1999; Bierwisch, 2008].

Степень синхронной работы между разными зонами мозга может выявить различия в обработке категорий слов. Было обнаружено, что изменения когерентности в диапазоне колебаний 1–10 Гц свидетельствуют о глобальной языковой обработке, процессах памяти и внимания, сопутствующих восприятию вербальных символов. Легко воображаемые глаголы (*бегать, собирать, спать* и т. д.) вызывают рост межполушарного взаимодействия в диапазоне частот 11–31 Гц в отличие от трудно воображаемых [Weiss, Mueller, 2003]. В задании определить принадлежность слова к конкретным частям речи (существительным, прилагательным, глаголам, частицам и т. д.) возникают различные паттерны гамма-активности. Существительные вызывают большую гамма-активность в зрительных областях, а глаголы — в моторных [Pulvermüller, 1999].

## 4.2. Нейрофизиологические основания чтения и письма

Если становление устной речи наблюдается на самых ранних этапах онтогенеза (до 2–3 лет), то формирование письменной речи — чтения и письма — происходит существенно позже (5–6 лет) и основано на уже установившихся связях нейронных комплексов. Чтение начинается с последовательного восприятия системы письменных знаков (графем, слов, предложений). Необходимо расшифровать эти знаки, понять значение отдельных букв и слов, объединить их в более крупные единицы информации — целые фразы и текст, удержать их в оперативной памяти и соотнести друг с другом, выделив сложные семантические единицы.

Чтение относится к самым новым высшим рефлекторным функциям в фило- и онтогенезе, требующим специально организованного обучения. В его осуществлении основное значение имеют наиболее поздно формирующиеся отделы коры головного мозга, в основном теменно-височно-затылочная область левого полушария. Кроме того, для их освоения необходимо тесное взаимодействие зрительного, слухового и двигательного анализаторов, достаточный уровень развития сложных произвольных действий (движения глаз по строкам текста и т. д.). Процесс чтения как вида интеллектуального развития обеспечивается усложнением связей нейронов, разрастанием нейронных сетей и их специализацией [Загородний, 2006; Лурия, 2009; Соколов, 1981; Смирнова, 2001].

Чтение обеспечивают следующие структуры мозга:

- *Теменно-затылочные отделы коры мозга в левом полушарии* отвечают за сохранность четких зрительных образов буквенных знаков и умение соотносить графическое начертание букв с их акустической и речедвигательной характеристиками. Несформированность этих участков приводит к оптической алексии, при которой дети с трудом узнают буквы, путают их по оптическим признакам (f — t, No. — h);
- *Вторичные зоны височной области левого полушария* отвечают за акустическое восприятие звуков. Несформированность этих зон вызывает нарушение процесса анализа и синтеза читаемого слова (сенсорную алексию). Ребенок зрительно узнает слово, но не может понять его значение из-за нарушения звукового анализа (прочитанное слово не складывается в целостный образ). Процесс чтения превращается в угадывание.
- *Нижние отделы премоторных зон левого полушария* несут ответственность за динамику речевого процесса. При несформированности этих структур возникают грубые персеверации, дефекты переключения с одного элемента на другой (моторная алексия). Дети прибегают к угадыванию значения слов или фраз. Антиципация смысла приводит к ошибкам чтения.
- *Лобные доли левого полушария мозга* отвечают за организацию чтения как речевой деятельности. Несформированность этих отделов приводит к искажению мотивации деятельности, распаду ориентировочных действий, стратегии чтения. Нарушается возникновение смысловых догадок и контроль за ними. Например: «Оля собрала в лесу...» Очевидно, что далее по смыслу речь будет идти о ягодах, цветах, грибах, то есть о том что можно собирать в лесу. Результатом становится неправильное понимание читаемого.

Чтение также представляет собой специфическую мыслительную операцию, в основе которой лежит становление и развитие многочисленных не-



рвных связей в коре больших полушарий при активном участии зрительного, речедвигательного и речеслухового анализаторов. В процессе чтения устанавливается новый вид временных связей второй сигнальной системы, которые ранее образовывались только со словами слышимыми и произносимыми. Слухо-речедвигательная ассоциативная цепь, являясь основой устной речи, дополняется зрительными и глазодвигательными звеньями, специфическим сигналом для которых является увиденное слово.

Установлено, что для формирования будущей компетенции в чтении у детей дошкольного возраста особое значение имеют три базовые функции, которые можно рассматривать и как когнитивные способности:

- *Фонологическое сознание*: способность понимать звуковое строение речи и воспринимать слово как единое целое. Она складывается благодаря умению выделять звуки (фонологическое сознание в узком смысле) и способности делить слова на слоги (фонологическое сознание в широком смысле).
- *Способность удерживать (сохранять) слова в рабочей памяти*: ребенок воспринимает последовательность слов на слух и воспроизводит их, чтобы понять смысл фразы. Аналогичное действие может производиться и на уровне отдельного слова: ребенок воспроизводит (произносит вслух) последовательность фонем для понимания значения читаемого слова.
- *Способность быстро актуализировать информацию, хранящуюся в памяти*.

Специализация корковых областей в процессе чтения отражает доминанту левой затылочной области. Фактор доминанты [Ухтомский, 2002] раскрывает доминирование определенной области мозга в процессе реализации какой-либо деятельности, подчиняющей себе активность нейронов других областей. Как и любое другое сложное графическое изображение, текст задействует зрительные анализаторы, нейронные сети которых располагаются в основном в затылочной части коры головного мозга. Это было подтверждено исследованиями алексии и аграфии, проводившимися А. Р. Лурией еще в 1950-х гг. (также см.: [Shaywitz, 2003; Dehaene, Changeux, Naccache et al., 2006; Wandell, 2011]). Левую затылочную область даже называют центром чтения [Shaywitz, 2003].

При выработке любого навыка на начальном этапе все составляющие его операции осуществляются полностью под контролем сознания. Когда навык сформирован, сознательный контроль фокусируется только на конечный результат всей цепочки действий. Процесс чтения, автоматизирующийся при обучении, представляет собой совокупность зрительного восприятия, артикуляционной моторики и семантической обработки, причем по мере совершенствования артикуляция устраняется. Поэтому, например, следует начинать

обучение чтению на иностранном языке с развития слухо-произносительных навыков, фонематического слуха. Зрительное восприятие играет ключевую роль в процессе чтения. Соответственно, предстоит изучить данные об особенностях восприятия письменного текста, движения глаз и учесть эту информацию в процессе обучения чтению.

ФМРТ позволила осуществить картирование речевой функции у людей разных возрастов. Так, у детей, обучавшихся чтению, выявлено участие левой задней верхней височной зоны коры в фонологических процессах и обработке звуков. У взрослых читателей были выявлены широкие участки левой теменной, височной и лобной зон коры, задействованные в процессе чтения. В целом исследования функции чтения на выборках взрослых людей свидетельствуют, что зрелые процессы чтения обеспечиваются работой лобной, височно-теменной и затылочно-височной зон левого полушария [Rapcsak, Beeson, Henry et al., 2009; Dehaene, Cohen, 2011].

Корреляция между мозговой активностью во время чтения и способностью к чтению демонстрирует более активное участие левой височной и фронтальной (лобной) зон, ассоциирующихся с фонетикой и семантикой в ходе обучения чтению. По мере обучения активность правой задней зоны снижается, отражая уменьшение роли систем, отвечающих за распознавание нелексических (нетекстовых) форм. В типичном случае становления читателя отмечалась активизация левой нижней лобной извилины, левой височно-теменной коры и левой нижневисочной коры. При дислексии же активизировалась только левая нижняя лобная извилина [Goswami, 2004; 2007].

Интересно, что межъязыковые исследования выявили вариативность активности мозга при чтении в зависимости от того, как письменная речь (орфография) языка представляет фонологию языка. Транспарентная письменная система (например, итальянского языка) отличается от нетранспарентной — написание не совпадает с произнесением (например, английский или русский) — и текстовой (на основе иероглифов как в Китае) систем письма. С одной стороны, независимо от особенностей письменной системы отмечается высокая степень активности одних и тех же областей мозга. Однако у учащихся, осваивающих язык с прозрачной письменной системой (в итальянском как слышится, так и пишется), проявляется большая активность в области *planum temporale*. Последняя представляет собой треугольную область, расположенную в верхней задней части левой височной доли (центр Вернике) и отвечает за распознавание речевых звуков. В случае с английским языком больше активирована зона визуализации словоформ (visual word form area, VWFA) в левой затылочно-височной зоне (рис. 4.2).

Хотя первоначально было предложено рассматривать нейрозону VWFA как субстрат визуального распознавания слов, она также включает фонологию в связи с большим количеством фонетико-орфографических взаимосвязей.

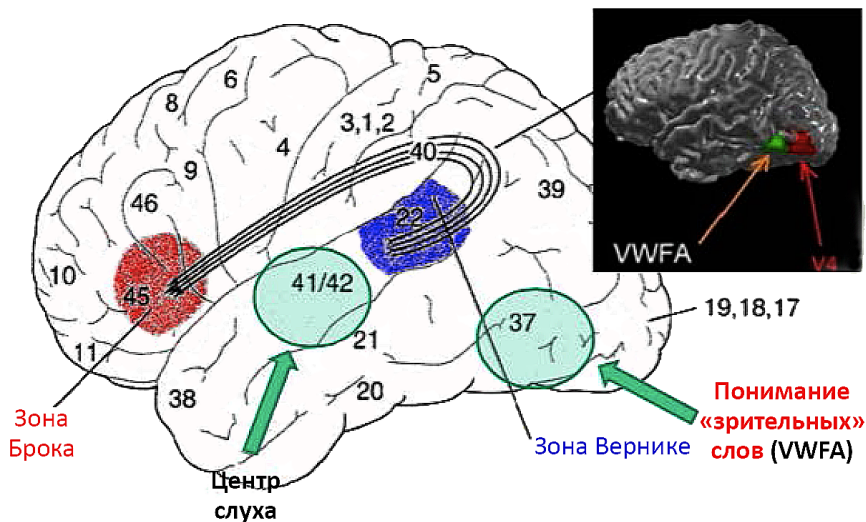


Рис. 4.2. Центр понимания слов (зоны мозга, функциональная активность которых связана с формированием представлений о значении слова) [Латанов, 2013]

Возможно, что бóльшая активация этой зоны в английском языке отражает несколько уровней звуко-буквенного соотношения (соответствия), что является важным при декодировании английского. У китайцев при чтении имеет место относительно бóльшая включенность зрительно-пространственных областей, по-видимому отвечающих за распознавание иероглифов [Siok, Perfetti, Jin et al., 2004]. При приобретении грамотности область VWFA в левой затылочно-височной зоне (описываемая некоторыми нейрочеными как «зона умений») у англоговорящих школьников вовлекается больше, а зоны, изначально активизированные в правом полушарии, отключаются.

С помощью метода ВП были выявлены временные показатели узнавания и названия (по сути, речепродукции) графических объектов [Rodriguez-Fornells, van der Lugt, Rotte et al., 2005]. Было выделено несколько временных этапов:

- предъявление картинки — 0 мс;
- выбор лексического концепта — 175 мс;
- определение леммы (основной формы слова) — 250 мс;
- обработка фонетических компонентов — 330 мс;
- фонетическая форма слова — 455 мс;
- артикуляция — 600 мс.

Наиболее распространенные изучаемые показатели ВП — P600 и N400. P600 связывают с напряжением при обработке неправильных или сложных

синтаксических конструкций. Эта компонента возникает в процессе повторного анализа слов или фраз с нарушенным синтаксисом. N400 — компонента, которая служит индикатором лексической преактивации и лексико-семантической интеграции [King, Kutas, 1995; Hagoort, Baggio, Willems, 2009; Moreno, Kutas, 2005]. Узнавание слова не ограничивается периодом зрительной фиксации, он может продолжаться и после нее, параллельно с обработкой следующего слова [Kliegl, Dambacher, Dimigen et al., 2012].

Поведенческие исследования позволили установить, что предчитатели (дети, только готовящиеся учиться читать) быстрее формируют навык чтения, если они могут распознавать фонологически близкие слова (например, рифмующиеся *cat* и *hat* или имеющие общее начало — общий первый звук, слог, например *cat* и *cup*). Картографические изображения подтверждают, что успешность начинающих читателей зависит от активности левой задней верхней височной зоны коры, у взрослых читателей идентифицированной как locus фонологического декодирования. Активность этого региона также модулируется фонологическими умениями у детей [Turkeltaub, Gareau, Flowers et al., 2003].

Понимание письменной речи обеспечивается взаимодополняющей специализацией полушарий с преобладанием левого полушария. В начале формирования навыка чтения преобладает активность правого полушария (оно обеспечивает анализ перцептивных свойств текста, создание эталонов, кодов зрительной информации), в дальнейшем, при упрочении рефлекса, начинает доминировать левое полушарие (оно отвечает за анализ и семантическую обработку полученной информации). Исследования нарушений функции чтения показывают, что при алексии и аграфии наблюдается недостаточная развитость левого полушария мозга, при дислексии — правого [Dehaene, Naccache, Cohen et al., 2001; Shaywitz, 2003; Скороходова, 2001].

Исследования детей с дислексией (тех, кто испытывает трудности при обучении чтению на фоне среднего интеллекта и образовательных возможностей) показывают, что у них продолжается активация правой височно-теменной зоны коры при чтении, что *атипично* для умеющих хорошо читать, менее активированы зоны в левом полушарии по сравнению с нормой.

Исследования с использованием выборки англоязычных лиц выявили, что целенаправленное обучение и развитие фонологических умений и звуко-буквенного анализа активизируют щелевую височную и теменную зоны, способствуют нормализации процесса чтения. Однако для подтверждения полученных данных требуются исследования в странах с другими языковыми системами.

Исследования [Goswami, 2004; 2007] свидетельствуют о возможности точечного изучения нейронных ансамблей, ответственных за приобретение навыка чтения. Полученные данные позволили бы отказаться от неэффективных методов обучения чтению. Кроме того, изучение нейронных систем чтения может выявить нейронные индикаторы потенциальных трудностей у ребенка,

которые изначально скрыты. Можно попытаться идентифицировать нейронные маркеры фонологической чувствительности (например, на такие фонологические стимулы, как рифма), чтобы определить, имеются ли предпосылки для появления трудностей в обучении чтению. Аналогично можно найти единые маркеры дислексии.

При чтении конкретных существительных по сравнению с абстрактными наблюдается рост межполушарной синхронной активности на частоте 13–18 Гц между левой фронтальной и задней правой областями коры головного мозга [Weiss, Mueller, 2003]. Зрительное восприятие глаголов вызывает бóльшую десинхронизацию тета-ритма в лобных областях, чем обработка существительных [Khader, Rösler, 2004]. В отличие от существительных, чтение глаголов также сопровождается меньшим уровнем когерентного взаимодействия между левой и правой фронтальными зонами, что предполагает разные стратегии обработки мозгом различных категорий слов [Jeannerod, 2008].

Дислексия часто сочетается с нарушением письма — **дисграфией**. Дисграфия приводит к неграмотности письменной речи, неправильному применению буквенных обозначений для написания слышимых звуков, смысловым ошибкам, нарушениям почерка. Как и дислексия, дисграфия связана с нарушением фонологического осознания. Дисграфия является характерным маркером поражения речевой зоны Вернике и пограничных областей (в частности, персильвиановой области). Кроме того, иногда патологические изменения регистрируются в височно-затылочных областях (нижней части височной доли), связанных со зрительной переработкой словесной информации. Этот регион участвует в зрительном восприятии слов и определении наличия/отсутствия ошибок в словах [Rapcsak, Beeson, Henry et al., 2009].

Чтобы выявить функциональную роль различных областей мозга в процессе письма, были проведены два вторичных метаанализа 18 различных исследовательских работ с использованием метода наибольшего правдоподобия (в математической статистике — метод оценивания неизвестного параметра путем максимизации функции правдоподобия).

Один из первых метаанализов проведен с целью разграничить центральные и периферийные процессы письменной речи [Purcell, Turkeltaub, Eden et al., 2011]. Центральные процессы письма обеспечивают извлечение абстрактных орфографических словоформ посредством орфографической лексики или механизмов преобразования фонем в графемы и их временного хранения в рабочей памяти [Hillis, Caramazza, 1989]. Периферические процессы вовлечены в образование букв, планирование и контроль работы моторики [Ellis, 1982].

J. J. Purcell и его коллеги [Purcell, Turkeltaub, Eden et al., 2011] ограничились анализом исследований нейрофизиологических механизмов наипростейших форм письма — отдельных слов, алфавита или распознавания похожих слов на слух, что, с одной стороны, дает четкое представление об отдельных этапах

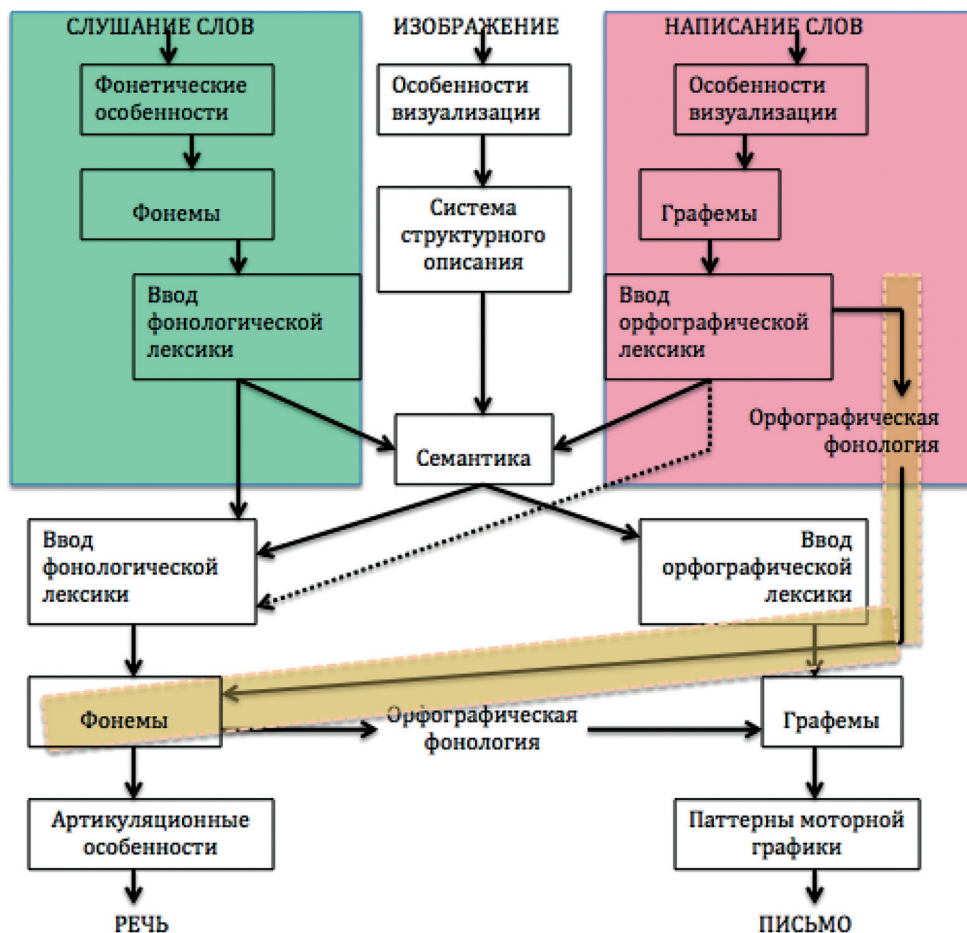


Рис. 4.3. Нейрокогнитивные процессы понимания устной и письменной речи [Hillis, Caramazza, 1989]:

зеленый блок — слушание слов, красный — написание слов, желтый — связь блока написания с элементами слухового распознавания слов

процесса письма, но, с другой стороны, очень далеко от процесса естественного, ежедневного писания.

Письменная речь включает в себя различные подпроцессы: анализ входящей информации, доступ к орфографической репрезентации слова, временное хранение в рабочей памяти. Многие описанные подпроцессы неспецифичны для письма. Они также представлены в механизмах чтения, рисования, устной речи (рис. 4.3).

Чтобы расширить данные о процессе письма, при вторичном анализе были включены данные о других видах письменной речи (словесный дик-

тант, изложение, генеративное письмо (сочинение)) и подключены релевантные результаты исследований из смежных областей. Включены работы, где достигнуто разграничение областей контроля отдельных компонентов письменной речи.

Для отдельного изучения сенсомоторных и визуально-пространственных компонентов процесса письма исследователи использовали различные стимулы: круги [Roux, Crisp, Liu et al., 2009], абстрактные символы [Omura, Tsukamoto, Kotani et al., 2004] или псевдобуквы [Longcamp, Anton, Roth et al., 2003]. Для выделения пространственно-визуального компонента было предложено исследовать мозговую активность при написании по воздуху (без специальных приспособлений) [Katanoda, Yoshikawa, Sugishi, 2001]. Наконец, чтобы исследователи могли взять двигательный компонент письма под контроль, в некоторых экспериментах испытуемые печатали, а не писали. Именно сравнительный анализ этих исследований дал понять, какие процессы специфичны для письменной речи, а какие — общие с другими функциями.

Акт письменной речи начинается с анализа поступающей информации [Ellis, 1982; Rapp, Hendel, Medina, 2002], что позволяет получить доступ к семантической системе, интегрирующей знания о предмете. Чтобы проконтролировать лингвистический компонент при исследовании письменной речи, одни исследователи дополняли визуально представленное испытуемым задание аналогичным аудиальным рядом [Brownsett, Wise, 2010], другие замещали внутреннее проговаривание и планирование дополнительной артикуляцией (выполнение письменного задания с одновременным проговариванием бессмысленного слога) [Roux, Crisp, Liu et al., 2009]. Наиболее успешными оказались исследователи, использовавшие сразу оба метода контроля [Rapp, Dufor, 2011; Segal, Petrides, 2012].

В результате были выявлены 12 корковых и подкорковых областей в основном в левом полушарии, три из которых специализированно отвечают за письменную речь: левая SFS (веретенообразная извилина) / MFG (средняя лобная извилина) область коры, левая внутривисочная борозда / верхняя теменная область и передний мозжечок (рис. 4.4, 4.5), в то время как другие связаны скорее с неспецифической моторикой (моторная кора, дополнительная моторная область, таламус и скорлупа чечевицеобразного ядра) или лингвистическими процессами (вентральная премоторная кора, задняя / нижняя височная кора).

Метаанализ исследований мозговой активности подтверждает решающее участие левых лобных и верхних теменных областей в процессе письменной речи. Эти результаты дают новое понимание когнитивных процессов, связанных с письменной речью и ее мозговыми субстратами.

Возраст освоения навыка письма, как правило, совпадает с началом обучения в школе. У младших школьников имеются существенные различия

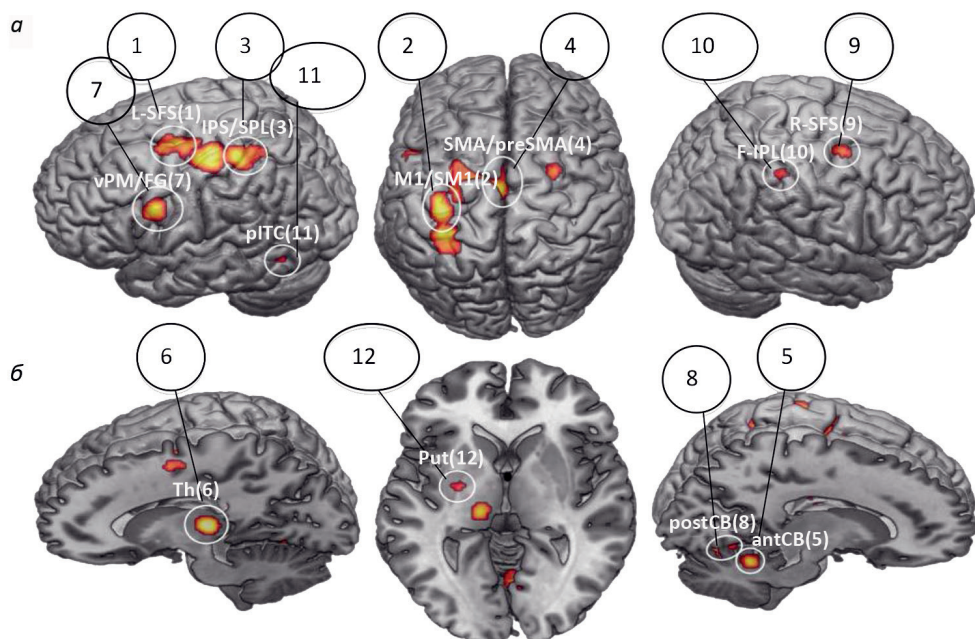


Рис. 4.4. Результаты метаанализа метода максимального правдоподобия: а — вид снаружи (слева, сверху, справа); б — вид изнутри (слева, сверху, справа); 1 — область левой фронтальной верхней борозды; 2 — область первичной моторики/сенсомоторики; 3 — область левой верхней теменной борозды; 4 — дополнительные и преддополнительная моторная область; 5 — передний мозжечок; 6 — таламус; 7 — область левой нижней лобной / премоторной зоны; 8 — задний мозжечок; 9 — правая верхняя лобная борозда; 10 — правая нижняя теменная доля; 11 — задняя / нижняя височная кора; 12 — скорлупа [Purcell, Turkeltaub, Eden et al., 2011]

в уровне функциональной зрелости нервной системы и готовности к школьному обучению. Навык письма формируется сверху вниз и требует участия высших двигательных и фронтальных отделов мозга. Существенную роль в успешности становления функции письма играет достаточная зрелость (сформированность) блока программирования и контроля действий (по А.Р. Лурии), то есть субстрата исполнительных функций. Однако в возрасте 7–8 лет основная нагрузка при письме все еще может ложиться на глубинные структуры, так как переднеассоциативные отделы мозга и их связи с подкорковыми структурами созревают к 16–20 годам. Было установлено, что причиной затруднений звукобуквенного анализа (пропуски букв при написании диктантов, недоразвитие системы значений, приводящее к семантическим заменам, например вместо яблоки розы) и становления почерка может быть незрелость фронтально-таламической системы [Семенова, Мачинская, Ахутина и др., 2001].



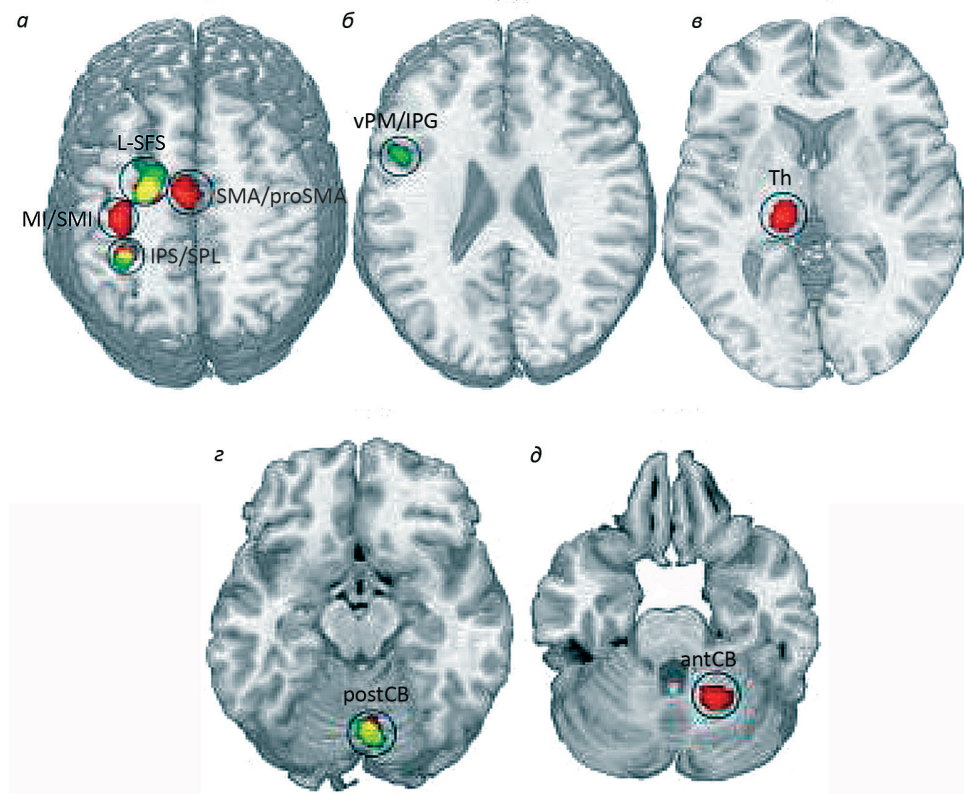


Рис. 4.5. Разная локализация активности участков мозга при контроле процессов вербального и лингвистического входа (красный) и контроля двигательной реакции — письма (зеленый). Перекрытие отображается желтым [Purcell, Turkeltaub, Eden et al., 2011]:

На рисунках представлены осевые срезы от  $z = -25$  до  $+50$  с шагом 10 мм

### 4.3. Нейрофизиологические особенности формирования математических умений

Результаты нейробиологических исследований математических способностей позволяют сделать вывод о наличии чувства числа, которое является врожденным. Уже с раннего возраста ребенок способен определить, какое множество содержит больше объектов, а какое — меньше. Также дети могут отличить точное количество в пределах до 3–4 элементов. Взрослые мгновенно (без подсчета) оценивают множества, содержащие до пяти объектов. Приблизительная система оценки размера множества является краеугольным основанием для математических способностей более высокого уровня. Любой дефицит этих врожденных способностей позже может стать причиной трудностей

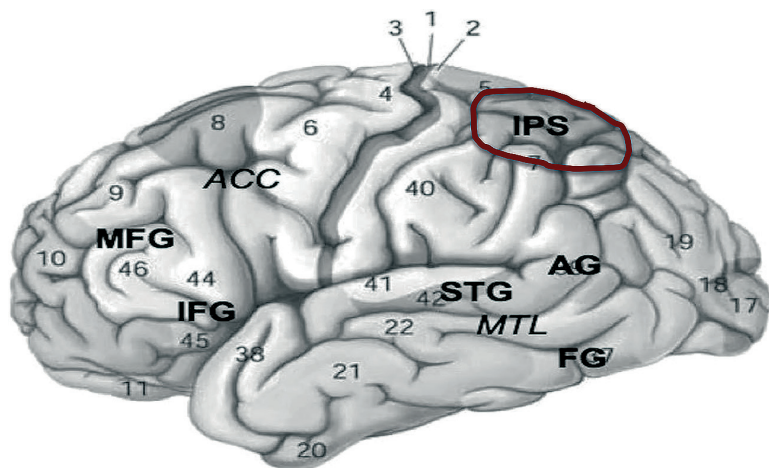


Рис. 4.6. Области мозга, важные для математических рассуждений:

IPS — внутритеменная борозда (обведена красным); AG — угловая извилина; IFG — область Брока / нижняя лобная извилина; STG — площадь Вернике / задняя часть верхней височной извилины; FG — веретенообразная извилина; MTL — медиальная височная / гиппокамп; MFG — средняя лобная извилина; ACC — передняя часть поясной извилины коры головного мозга. Полу жирным отмечены боковые поля (то есть вблизи внешней стороны мозга), курсивом — медиальные области (около центра мозга). Цифрами обозначены поля Бродмана [Varma, Schwartz, 2007, p. 151]

в обучении математике. В ряде исследований было установлено, что нарушение функционирования примитивной числовой системы оценки в раннем возрасте может предсказать, что у ребенка не будет значимых достижений в арифметике и стандартных математических тестах.

На рис. 4.6 представлены области мозга, имеющие наиболее существенное значение для математических действий. **Внутритеменная борозда (IPS)** отвечает за оценку количества элементов во множествах. Этот участок часто называют органом арифметики. Внутритеменная борозда возбуждается при выполнении любых мыслительных операций, связанных с количествами и арифметикой, это подтверждает центральную роль данной функции в математическом мышлении. **Префронтальная кора** отвечает за нормальное развития математических навыков и за сознательную рассудочную деятельность, внимание и рабочую память. **Левая угловая извилина** считается высшим центром абстрактного мышления, осуществляющим связь и координацию других центров, расположенных в лобных, теменных и височных долях коры. Также левая угловая извилина имеет особое значение в понимании метафор. Угловая извилина активизируется при решении знакомых задач и отвечает за извлече-

ние фактов из долговременной памяти. Осмысление символов — слов и цифр, обозначающих числа, — требует активной работы некоторых участков височной доли, прежде всего **веретенообразной извилины**. Она также обеспечивает функцию различения лиц [Feigenson, Dehaene, Spelke, 2004; Zamarian, Ischebeck, Delazer, 2009].

*Функциональная асимметрия.* При выполнении математических операций в функциональной обработке информации участвуют оба полушария головного мозга, при этом теменно-височные зоны левого полушария играют ведущую роль. Такая же асимметрия наблюдается и в лобных отделах.

*Взаимодействие корковых областей и системная организация процесса мышления:* организация межцентрального взаимодействия зависит от характера выполняемой мыслительной операции. При мысленной вербальной деятельности наблюдается усиление межцентрального взаимодействия между передне- и заднеассоциативными речевыми зонами левого полушария. Решение арифметических задач сопровождается формированием функциональных объединений лобных областей с височными отделами левого полушария и теменными правого, что связано с активизацией речевой памяти (левая височная область) и пространственных синтезов при операциях с цифрами (правая теменная зона) [Дубровинская, Фарбер, Безруких, 2000].

Активное исследование математических умений на основе нейровизуализации показывает, что многие математические компетенции лучше обусловлены образующейся нейронной сетью, связывающей разные области мозга. Были найдены маркеры селективной активации внутритеменной борозды при вычитании однозначных чисел. Это подтверждает, что внутритеменная борозда реализует компетентность операции вычитания. Выявлена активация в этой области в течение обработки зрительно-пространственной ориентации. Таким образом, можно предположить, что задания на вычитание решаются путем мысленного перемещения по воображаемому ряду чисел. В исследованиях умножения была выявлена селективная активация угловой извилины, что позволило связать эту область с реализацией операции умножения. Также выявлена активация в области угловой извилины во время получения фонологической информации. Эти данные послужили основанием для вывода о выполнении умножения через систему поиска (выскивания) в вербальной форме закодированной таблицы умножения [Dehaene, Pierra, Pinel et al., 2003]. То есть вычитание включает обработку зрительно-пространственной ориентации, а умножение — словесную обработку. В то же время в более поздних исследованиях было показано, что не только внутритеменная борозда и угловая извилина активируются при вычитании и умножении соответственно. В исследованиях с использованием нейроскайнера зафиксированы сетевые эффекты. Для выполнения операции умножения активируется больше областей мозга, чем при вычитании.

На основании исследований удалось сформулировать некоторые рекомендации для обучения математике. Развитие математического мышления и способность к мысленному оперированию в большой степени зависят от освоения ребенком системы зрительно-пространственных отношений [Ostad, 1998], необходимо развитие понимания пространственных отношений и величины как на вербальном, так и на невербальном уровне. Это обеспечивает точные манипулятивные движения, ориентировку на листе тетради, на странице в книге, пользование геометрическими приборами. Например, вычитание следует преподавать с опорой на пространственные представления, такие как количество линий, их расположение, чтобы задействовать функциональную специализацию внутритеменной борозды. Однако опоры только на представления о положении числа в числовом ряду недостаточно, чтобы овладеть операцией вычитания. Умножению следует учить в устной форме, например заучивая таблицу умножения вслух, чтобы задействовать угловую извилину. При этом простое запоминание не является достаточным для овладения умножением. Предлагаемые детям задания должны предоставлять возможности для интеграции различных значений и операций с числами. В этом случае будут формироваться скоординированные нейронные сети.

Экспериментальное исследование эффектов чистого запоминания и обучения алгоритмам при вычислении решения показало различия в активности головного мозга при обучении разными методами. В исследовании [Delazer, Ischebeck, Domahs et al., 2005] участникам предлагалось усвоить новую арифметическую операцию. В одном случае испытуемые должны были запоминать ответы в задачах с конкретными числами. Сама операция, то есть как вычислить ответ, не раскрывалась. В другом случае исследователи обучали алгоритму вычисления ответа, давая одни и те же числа. Обе группы затем решали знакомые и новые математические задачи в нейросканере.

Результаты показали, что участники, которым предложили только механическое запоминание алгоритма решения, организовали одну нейросеть, чтобы выполнить операцию, а участники с условием поиска стратегии вычисления — другую. Например, в сеть с запоминанием был включен домен угловой извилины, который активировался при извлечении кодированной информации в устной форме, тогда как в сеть со стратегией вычисления включена передняя часть поясной извилины, которая вовлечена в контроль когнитивной обработки информации. Интересно, что сформировавшаяся сеть поддерживала переход к новым проблемам (78 % точности) у участников со стратегией вычисления, этого не происходило у участников со стратегией запоминания (15 % точности).

Формирование нейронных сетей для математических вычислений отличается высокой пластичностью. Так, исследование стратегий [Baroody, 1985; Siegler 2007; DeSmedt, Ansari, Grabner et al., 2011], которыми дети пользуются при выполнении арифметических операций, например при решении простой

арифметической задачи с помощью фактов извлечения (зная, что  $12 - 4 = 8$ ), стратегии разложения (например, решение  $12 - 4 = 12 - 2 - 2 = 8$ ) или отсчета (например, решение «12 минус 4» на отсчет 12, 11, 10, 9, 8), показали, что они отличаются у разных людей и даже могут отличаться у одних и тех же людей от одной пробы к другой во время эксперимента [Siegler, 2007].

Недостаточная активность, объем рабочей памяти меньше нормы, структурные и функциональные нарушения внутритеменной борозды и угловой извилины мозга приводят к развитию **дискалькулии** — пониженной способности к обучению арифметике. Эта проблема отмечается примерно у 5–7% детей школьного возраста. Дети, страдающие дискалькулией, не понимают смысла чисел: их мозг не может установить соответствие между числом и множеством, которое оно обозначает (представлением о количестве). Например, в норме при предъявлении двух разных игральные карты ребенок сразу видит, какая из них старше — пятерка или восьмерка. Для получения такого вывода ребенку с дискалькулией приходится старательно пересчитывать значки на обеих картах. Интересно, что способность к количественным оценкам взаимосвязана с умением различать собственные пальцы. Как правило, дети начинают осваивать арифметику посредством счета на пальцах. Для этого нужно установить соответствие между своими пальцами и пересчитываемыми предметами. Дети, страдающие пальцевой агнозией (синдромом Гершмана), путаются в собственных пальцах. Например, если учитель называет или показывает на своей руке палец, эти дети не могут найти тот же палец и у себя. Пальцевая агнозия связана с дефектами теменной доли. Как правило, таким детям с трудом дается арифметика.

В исследованиях проблемы дискалькулии на уровне коры головного мозга было установлено, что при решении арифметических задач у детей с дискалькулией внутритеменная борозда работает менее активно, объем серого вещества в этом отделе мозга у них меньше, чем у сверстников, не испытывающих трудностей с арифметикой. Кроме того, слабее развиты нейронные связи между веретенообразной извилиной и теменными долями [Vogel, Kaufmann, 2009].

Продолжается поиск эффективных методов коррекции дискалькулии. Традиционный подход к коррекции дискалькулии заключается в том, что на дополнительных занятиях учитель пытается разъяснить ребенку конкретные факты и правила. Подход представляется недостаточно эффективным. Имеющиеся нейробиологические данные позволяют сделать вмешательство педагогов и психологов ориентированным на причину проблемы. Так как основным участком, ответственным за базу математических способностей — оценку множеств, является внутритеменная борозда, на эту зону должны быть направлены основные воздействия при тренировке. Предположительно может помочь система специально разработанных упражнений, развивающих способность к оценке количества объектов во множествах. Это, в свою очередь, будет спо-

способствовать пониманию смысла чисел. Некоторые авторы предлагают использовать обучающие компьютерные программы (в том числе в игровой форме), специально разработанные с учетом нейробиологических данных [Räsänen, Salminen, Wilson et al., 2009].

**Арифметическая нейронная сеть** формируется в ходе овладения математикой. В начале обучения математические рассуждения у детей сопровождаются более сильным возбуждением префронтальной коры, так как все математические вычисления (действия) осуществляются под активным сознательным контролем. По мере автоматизации все больше работы берут на себя теменные доли и веретенообразная извилина. Однако без активной работы внутритеменной извилины ни простые, ни сложные арифметические задачи не могут быть решены.

Исследования часто демонстрируют взаимосвязь между мозговыми механизмами математических умений и чтением. Можно говорить о «нейронном перекрытии» в левой височно-теменной коре. В ходе обработки данных и чтение и арифметика используют фонологический код языка. Предполагается наличие специфической ассоциации между фонологическим осознанием, мерой качества фонологических представлений и процессом арифметического извлечения фактов [DeSmedt, Ansari, Grabner et al., 2010]. Качество детских фонологических представлений может опосредовать индивидуальные различия в поиске арифметических фактов [DeSmedt, Ansari, Grabner et al., 2010]. Более четкие фонологические представления способствуют более легкому извлечению арифметических фактов. Эти результаты особенно интересны для потенциальных исследований в области психологии образования в связи с тем, что исследования чтения и математики проводятся отдельно.

В развитии математических понятий важную роль играет функция контроля глазных мышц, которая находится в тесной связи с вестибулярной системой. При овладении понятием натурального числа и математическими действиями значительную роль выполняют зрительный и слуховой симультанный анализ и синтез [Лалаева, Гермаковска, 2005].

Исследования, изучающие воздействие различных методик обучения математике на активацию мозга, пока немногочисленны. Так, было проведено сравнение активности мозга при обучении по принципу тренировки и механического заучивания [Caine, Caine, 2010]. Полученные модели активации мозга с использованием двух учебных подходов сильно отличаются, хотя поведенческие данные показали, что в обоих учебных подходах формируемые математические умения были усвоены. Нейронные корреляты решения алгебраических задач изучены с помощью диаграммного метода (нужно было сделать визуальную репрезентацию с формулировкой в словесной форме) и символического метода (задание в словесно-логической форме нужно было преобразовать в символическое уравнение/равенство). Если поведенческая производитель-

ность в обоих условиях была равной, то использование символического метода продемонстрировало бóльшую активацию верхних теменных долек и предклинья (участок теменной доли на внутренней поверхности обоих полушарий большого мозга, расположенный над мозолистым телом и впереди него). Возможно, символический метод требует большего внимания к условиям задачи.

## 4.4. Нейродидактические основы обучения

Сегодня имеющиеся в литературе данные позволили сформулировать нейробиологические основы обучения, создающие условия для эффективного достижения результатов, доказательную основу использования тех или иных методов преподавания и учения.

Опыт — один из ключевых элементов обучения. Структурирование, параллельное усвоение (обмен опытом между обучающимися относительно полученного опыта) и задачи-вызовы улучшают обучение за счет функциональной активности мозга, требующей интеграции сенсорной информации, ее вербализации и абстрагирования [Kolb, Kolb, 2005]. Ученик усваивает конкретный опыт благодаря активации сенсорной коры (вовлечению интегративной коры сзади), отражающей процессы восприятия наблюдаемых явлений, формируя новые абстрактные понятия (вовлечение фронтальных участков коры, моторных зон коры) (рис. 4.7). Таким образом, процесс обучения возникает и выстраивается сообразно с механизмами работы структур мозга [Kolb, Kolb, 2005; Zull, 2002].

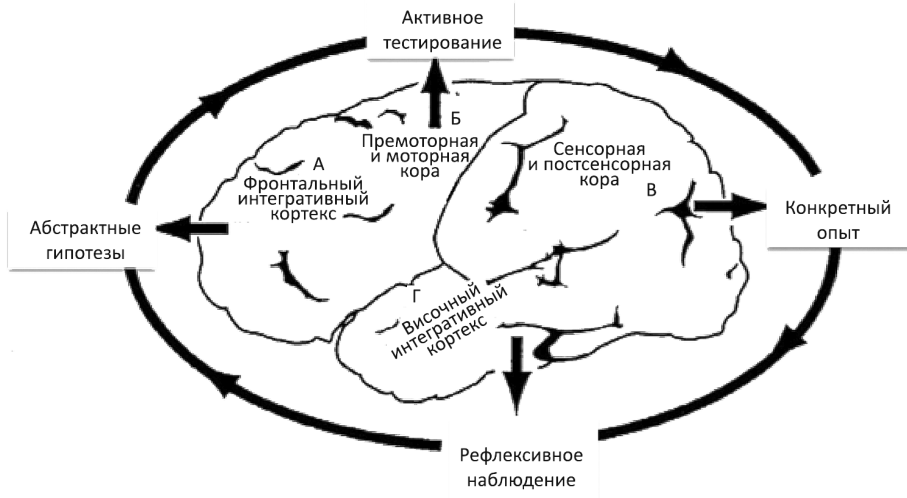


Рис. 4.7. Цикл экспериментального обучения и зоны мозга, активированные во время обучения [Zull, 2002]

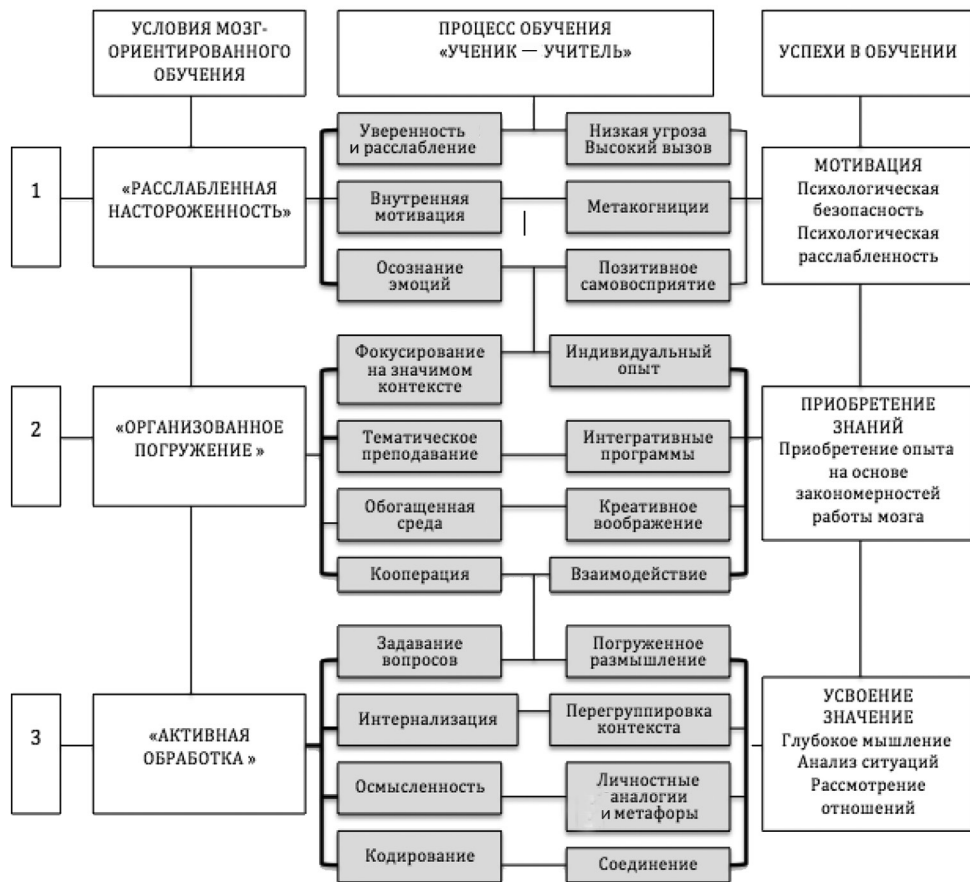


Рис. 4.8. Мозг-ориентированная интегративная модель обучения [Duman, 2010]

Опыт и физическая активность, внутренние и внешние раздражители в результате экспериментирования усиливают синаптические связи между нейронами. Предложена и апробирована интегрированная модель мозг-ориентированного обучения [Duman, 2010] (рис. 4.8). Модель состоит из трех вертикальных и горизонтальных структур. Вертикальные оси представляют собой условия модели, процесс обучения «учитель — ученик», основанный на этих условиях, а также результаты обучения (получаемые преимущества). Горизонтальные оси — это элементы, касающиеся того, как эти три условия реализуются в процессе обучения.

Соответственно, первое условие — безопасность (расслабленность/напряженность) — предполагает положительный настрой, создание позитивного самовосприятия, понимание со стороны учителя уникальности каждого ученика, стиля его познавательной деятельности, интеллектуального потен-



циала. Необходимо обеспечить возможность сотрудничества и групповой работы, и то и другое повышает осведомленность и снижает напряженность. Этому же способствуют периодические свободные перемещения по классу и возможность обсуждения. Индивидуальные задания внутри группы, создание портфолио или исполнение своей роли повышают ответственность учащегося, помогают ему оценить свои возможности. Таким образом, первое условие предполагает поддержание физиологической безопасности и психологического комфорта.

Второе условие — спланированное погружение — включает сосредоточение на значимом содержании, индивидуальный опыт и определение конкретных учебных тем. Нужно обсудить с учащимися темы, с тем чтобы они приобрели личностный смысл (зачем?). Образовательную среду целесообразно насытить визуальными материалами (подойдут плакаты, графики, рисунки, мультимедиа, комиксы, карикатуры и т. д.), примерами из жизни, стоит обратиться к опыту студентов. Приветствуются разыгрывание по ролям и проекты, как итоговые работы, обобщающие несколько уроков или тем (по модулям) и привязанные к реальным ситуациям. Например, после изучения темы, связанной с измерениями и инструментами измерения, учащиеся могут подготовить презентации о том, как можно использовать измерения и инструменты при оценке технических или природных объектов. Кроме того, полезно вместе с учащимися обсудить методы и инструменты оценки их компетенций (результатов обучения) на экзамене.

Третье условие — активное обучение — предполагает использование технологии постановки вопросов и глубокого осмысления. Вопрос — важный прием, заставляющий любого человека начать думать. Если есть вопрос, значит, существует смысл. Этот смысл может иметь как предметное, научное, практическое содержание, так и личное. Для последнего необходимо использовать различные истории, образовательные игры, решение кроссвордов с реальным содержанием, расширяющим систему знаний.

Необходимо соблюдать содержательные и временные параметры урока, чтобы умственное напряжение рационально сочеталось с отдыхом [Hall, 2005]. Активность обучающихся и презентация учебного содержания могут быть описаны по схеме «концентрация — снижение умственного напряжения — концентрация». Например, в течение первых 15–20 минут урока учитель объясняет основную тему и подтемы различными методами, с использованием различных материалов, драматических приемов и визуализаций. Когда у обучающихся снизится концентрация, учитель задействует междисциплинарный подход с включением музыки, рисунков, карикатур и групповой работы для усвоения и дальнейшего рассмотрения темы. Последние 10–15 минут урока он посвятит кодированию информации, проводя опрос, предлагая учащимся нарисовать концептуальные карты. Они

Таблица 4.1. Реализация экспериментального подхода в обучении [Caine, McClintic, 2009, p. 269]

Подготовка учителя	Учебный цикл	Активная обработка
Знание, как добиться успеха	Создание аутентичных рабочих групп (команд)	Постоянное стремление достигнуть запланированного
Идентификация основных понятий, которые должны быть усвоены обучающимися	Развитие мирового опыта (соотнесение понятийного ряда с развитием науки и практики)	Основные понятия
Знание всех основных компетенций, умений, фактов и т. д., которые должны быть усвоены	Включение исследовательских вопросов в образовательный процесс. Организация исследовательских групп. Развитие рубрик (пунктов) исследования. Проведение экспериментов самими учащимися. Содействие углубленному изучению научной проблемы. Оказание помощи в планировании и документировании результатов исследования. Развитие и раскрытие основных пунктов документации и исследовательских отчетов	Ключевые факты и умения

должны осознать, что происходило на уроке, в их памяти должны закрепиться информационные «следы». Закончить урок можно несколькими вопросами, приоткрывающими тему следующего урока, что активизирует любопытство и запустит эффект незавершенного действия (эффект Зейгарник).

Разработаны некоторые простые и практические рекомендации, как использовать экспериментальный опыт в учебной ситуации [Caine, McClintic, 2009] (табл. 4.1). Получение опыта во время обучения может отличаться как по содержанию, так и форме, но описанные фазы цикла обучения будут присутствовать независимо от тематики, направленности или дисциплины. Нейродидактический подход, направленный на получение опыта, будет работать только в богатой стимулами и мотивирующей среде обучения, когда правильно выстроена командная работа учителя и учащихся.

Оптимальным учебным опытом называются учебные задачи-вызовы, которые инициируют овладение новыми умениями [Csikszentmihalyi, 1991]. Если задача слишком легкая для обучающихся (не требует развития умений для получения результата), им становится скучно. Если задача слишком трудная

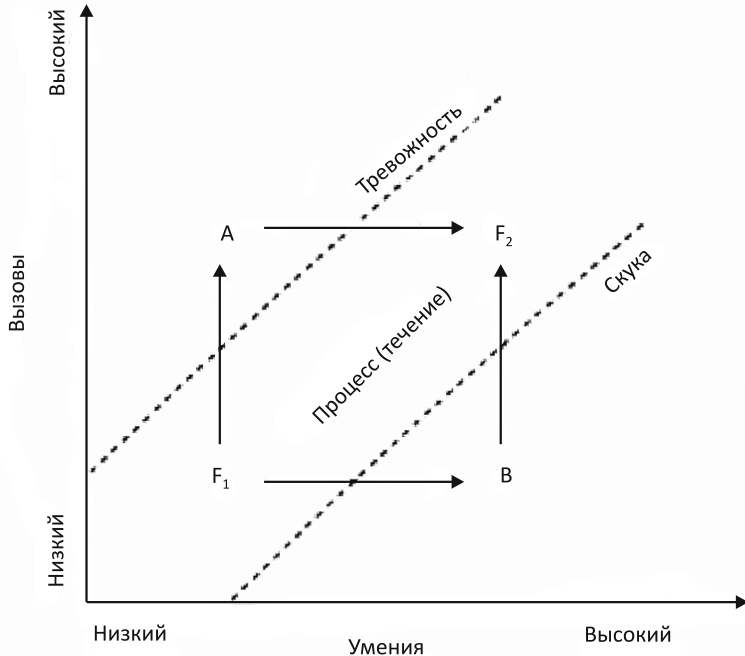


Рис. 4.9. Оптимальный учебный опыт [Csikszentmihalyi, 1991, p. 74]

(отсутствуют умения, чтобы справиться с вызовом), у обучающихся возникает тревога, фрустрация, негативный стресс (рис. 4.9).

Каждый раз, когда ученик развивает необходимые умения для решения задачи, он движется от F1 к B. Учитель должен предлагать более трудные задания («вызов») пропорционально тому, как учащийся приобретает новые умения (переход от B к F2). Чрезмерную трудность задания и связанный с ней рост тревожности иллюстрирует переход от F1 к A (уровень умений низкий, недостаточный, а задача трудная). Логично предположить, что в этом случае обучающиеся должны попытаться развить свои умения (двинуться от A к F2). Однако в большинстве случаев этого не происходит. Учащиеся отказываются от решения, чувствуют угрозу, страх неудачи или опасность потери авторитета, престижа, снижения самооценки и т. д. В таких случаях мозг фокусирует избирательное внимание и запускает цепь реакций, активирующих амигдалу, чтобы отправить сообщение в гипоталамус, который начинает каскад химических реакций в надпочечниках. Через некоторое время глюкокортикоиды (например, кортизол) и норадреналин подготавливают организм, чтобы справиться с ситуацией. Системы управления, расположенные в лобных долях, также активируются для мониторинга происходящего. Состояние селективного внимания понижает познавательную способность мозга.

Мозг в буквальном смысле переориентирует активность от коры в более древние образования, отвечающие за автоматизмы и существующие и у млекопитающих, и у ящериц [MacLean, 1990]. В этом случае умственная активность претерпевает ряд изменений, так как мозг теряет некоторые способности, например способности правильно интерпретировать тонкие сигналы окружающей среды, сохранять и оценивать информацию. Имеет место автоматизация действий, ответы становятся ограниченными, снижается способность воспринимать отношения и закономерности. Возможности сложной умственной деятельности (мыслительные навыки высшего порядка) нивелируются. Емкость долговременной памяти уменьшается.

С учетом изложенного выше учителям имеет смысл запомнить следующую рекомендацию: «На практике многие требования, которые мы накладываем на школьников, начиная от необоснованного ограничения времени обучения и сдерживания индивидуальности мышления к чрезмерной конкуренции и мотивации с помощью стыда и вины, заставляют всех, кроме наиболее устойчивых школьников, снижать свои умственные способности, переключаясь и тяготея к автоматизированным действиям. В связи с этим мы полагаем, что большинство школ поддерживают значительную часть обучающихся в состоянии пониженной умственной активности (статусе дауншифтинга), слабо вовлекая их в комплексное обучение» [Caine, Caine, 1991, p. 75].

#### *12 принципов биологической природы обучения*

1. Обучение включает физиологические процессы (необходимо учитывать вовлечение физиологии в процесс обучения).
2. Мозг / ум социален (человек учится более продуктивно в группе, чем индивидуально).
3. Поиск смысла является врожденным (любой познавательный опыт имеет обучающий потенциал, только если имеет личностный смысл).
4. Поиск смысла происходит через образец (паттерн) (в поиске смысла человек ориентируется на сформировавшиеся модели и алгоритмы).
5. Эмоции вносят существенный вклад в усвоение паттерна (положительные эмоции увеличивают продуктивность, отрицательные сокращают познавательную деятельность, переводя ее в режим автоматизмов).
6. Разум / мозг обрабатывает части и целое одновременно (важны как детали учебного материала, так и целостный конструкт учебной темы).
7. Обучение включает в себя фокусировку внимания и периферическое восприятие (необходимо активно вычленять ключевые элементы, притягивающие внимание, и учитывать фоновые стимулы — шумы (бесполезные для данного учебного содержания), с тем чтобы нивелировать их, в процессе образования использовать дополнительные

материалы по теме). Кроме того, следует помнить, что отвлечение — естественный процесс. Каждый стимул, даже фоновый, может оказаться в фокусе внимания, если он усиливается.

8. Обучение всегда включает в себя сознательные и бессознательные процессы (некоторые процессы, в том числе связанные с принятием решения, ингибиторным контролем, процессами восприятия и памяти, протекают неосознанно).
9. Существует по крайней мере два способа организации памяти: пространственная система памяти и система для механического заучивания (необходимо активно использовать обе системы в учебном процессе).
10. Обучение является развитием (учебный материал всегда должен содержать потенциал для движения вперед).
11. Комплексное обучение более эффективно, если есть вызовы (сложные, нестандартные, творческие задания), и тормозится, если поступают угрозы.
12. Каждый мозг является уникально организованным (несправедливо требовать от учеников одинакового стиля познавательной активности).

#### *Нейродидактические положения для обучения*

- Приемы, облегчающие восприятие новых тем, могут повысить эффективность обучения и продуктивность запоминания.
- Обзор (того, что было на прошлом уроке и связь нового материала с уже изученным, или того, что будет изучаться сегодня) в начале урока подготавливает почву, этот неявный эффект памяти облегчает распознавание незнакомой или имплицитной информации.
- Самостоятельное структурирование и организация учебного материала повышают продуктивность усвоения (естественная способность мозга к структурированию и упорядочиванию активируется в контексте осознания и запоминания новой информации, трансформируя ее в знания).
- Постоянное обращение учителя (возвращение / упоминание / отсылка) к ранее изученным темам актуализирует следы в памяти учащихся и образование новых связей между уже усвоенным и изучаемым [Brand, Markowitsch, 2009].

Для активации интегративных процессов в мозге предлагается работа в команде, метод проектов, использование мультимедиа [Brand, Markowitsch, 2009] — такие виды деятельности, которые требуют сочетания активации зон мозга, отвечающих либо за протекание разных когнитивных процессов, либо разных функций (например, когнитивной и аффективной, когнитивной и социальной, исполнительной, когнитивной и аффективной).

Важным принципом нейродидактического образования является активная роль учащихся: сами учащиеся выступают в роли учителя (метод обучения преподаванием) [Kraus, 2008]. Например, они учат своих одноклассников (весь класс или отдельную группу) или младших по возрасту либо консультируют другого по вопросу, в котором лучше / глубже (наоборот, хуже / тяжелее) разбираются.

Краткий обзор основных рекомендаций для повышения эффективности обучения позволяет составить общее представление об уровне имплементации достижений нейронауки в образовательную практику. Большая часть сформулированных в настоящее время рекомендаций относится скорее к теории, и очень немногие проекты изучали влияние нейродидактических подходов непосредственно в классе.

По своему содержанию нейродидактика связана с различными исследовательскими дисциплинами и, следовательно, интегрирует несколько теорий, концепций и методов, но последние по большей части изучены исключительно в качестве единичных технологий в различных контекстах, но не как совокупность методов и вне контекста нейродидактики. Тем не менее отдельные эксперименты позволяют говорить о формировании условий для создания доказательной образовательной практики.

Одной из наиболее значимых работ в области нейро- и психодидактического подхода к методам обучения является книга J. Hattie «Visible Learning» (2009). В течение 15 лет проанализировано более 50 000 исследований и 800 метааналитических обзоров, участниками которых стали миллионы обучающихся, систематизированы наиболее доказательные педагогические практики, повышающие эффективность обучения. Наиболее эффективным является видимое обучение, когда в учебном процессе имеется явная цель и в соответствии с ней учитель дает учащимся обратную связь о продуктивности обучения, все субъекты образования проявляют активность, вовлеченность и демонстрируют энергичное участие.

Основной особенностью всех исследований является описание наибольших эффектов в ситуациях самообучения: когда учитель и сам учится в процессе работы [Костромина, 2007б] и когда обучающиеся самостоятельно осваивают новый материал. В связи с этим наиболее желательными атрибутами учения являются самоконтроль (самомониторинг), самооценка, самостоятельное отслеживание динамики достижений и самообучение. Кроме того, имеющиеся исследования подтверждают тот факт, что чем более прозрачным для ученика является процесс его обучения (когда он понимает, что и зачем он делает, каждое предложенное учителем действие объясняется с точки зрения его роли в образовательном процессе), тем выше продуктивность учебной деятельности. Каждый шаг, каждое действие, каждая ошибка должны быть понятны ученику, особенно если учебное содержание осваивается с трудом. Учитель

должен четко понимать, когда обучение идет правильно или неправильно, в каких случаях нужно экспериментировать, как контролировать, какие формы обратной связи использовать, пробовать альтернативные стратегии обучения, когда используемые стратегии не работают [Костромина, 2007б]. Лейтмотивом обучения является понимание, что «чем больше ученик становится учителем и чем более учитель становится учеником», тем выше учебные достижения. Учитель должен постоянно искать обратной связи от учащихся и коллег о своей профессиональной деятельности, ее качестве, эффективности.

Для обучения наиболее значимы следующие факторы: ребенок, дом, школа, учитель, учебный план и подходы к обучению [Hattie, 2008; 2011]. Ребенок (обучающийся) влияет на учебный процесс в меру своей индивидуальности и личностных диспозиций (генетики, опыта предыдущего обучения, домашнего воспитания и т. д.). Семья (дом) оказывают влияние, когда поддерживает достижения в учебном процессе, выражает положительные ожидания либо посредством отказа в этой поддержке, негативного отношения к результатам учения, дискредитации и унижения, что может быть вредным и разрушительным. Наиболее мощные эффекты, связанные со школой, определяет атмосфера в классе, межличностное взаимодействие и отсутствие деструктивных обучающихся в учебной группе. Учитель влияет в силу того, что у него есть ожидания, способность к открытости и концепция обучения. Значимым аспектом является качество преподавания в восприятии учеников. Учебный план должен быть сбалансированным, одновременно обеспечивая легкость и глубину понимания на основе конкретных учебных задач и четко определенных критериев успеха.

В результате критического анализа выделены 20 переменных, больше всего влияющих на обучение и учебные достижения [Hattie, 2008], которые приведены в приложении, переменные с низким или негативным эффектом влияния. Например, очень маленький или фактически несущественный эффект оказывают личность обучающегося, способность к взаимодействию, иерархическая структура обучения (формирование одних навыков после других), совместное преподавание, структура семьи и взаимодействие учителя с семьей, диета, физические упражнения, дистанционное обучение, традиции, летние каникулы, а также пол. Таким образом, вопреки распространенному убеждению, что обучение по-разному происходит у мужчин и женщин, психологические переменные свидетельствуют — они скорее похожи, нежели отличаются [Hattie, 2008; 2011].

Нейрофизиологическая специфика активного обучения и обучения через экспериментирование на основе принципов мозг-ориентированного обучения достаточно ярко проявляется при организации работы обучающихся в лаборатории [Ozden, Gultekin, 2008]. В частности, студентам было предложено сидеть, образуя форму «U», чтобы обзор был максимально свободен, было видно доску, демонстрации, видео и т. д., и самим учащимся было легче взаи-

модействовать. При групповой работе класс делился на группы по 4–6 человек. Выполнение тестов, фиксирующих динамику учебной деятельности, проводилось индивидуально, в отдельных помещениях. В методике преподавания учтены основные фазы работы мозга: 1) спланированное погружение; 2) расслабленная бдительность и 3) активная обработка.

*Фаза погружения.* Предлагались презентации, выполненные в программе PowerPoint, мультфильмы, комиксы, документальные фильмы и различные иллюстрации, помогающие понять учебный материал (тему). После презентаций была организована индивидуальная или групповая работа.

*Расслабленная бдительность.* Были сформированы гетерогенные группы, позволяющие участникам сотрудничать, чтобы глубже погрузиться в предмет. Участники рисовали схемы, им предлагалось написать короткие рассказы, стихи, нарисовать комиксы, связанные с предметом. Далее им была предоставлена возможность разработать проекты, которые затем обсуждались в классе. Участники из других групп задавали вопросы. Таким образом информация, полученная во время погружения, усваивается в фазе расслабленного бодрствования.

*Активная обработка.* Для удержания полученной информации и структурирования знаний использовались моделирование, групповые дискуссии, ролевые игры, драматизации, их применение в новой ситуации. Кроме того, на этапах расслабленного бодрствования и активной обработки участники слушали классическую музыку, а исследователь находился рядом, выступая в качестве члена группы, помогал группе, когда это было необходимо, создавал атмосферу в классе.

По итогам такого обучения был установлен более высокий уровень усвоения учебного материала и значительно меньшие потери (забывание, стирание) информации на протяжении длительного периода после обучения, чем при традиционном преподавании.

В заключение этого раздела приведем еще несколько примеров того, как можно эффективно использовать закономерности работы мозга в учебном процессе.

### **Как повлиять на процессы памяти?**

**Пример 1.** Несмотря на то что в долговременной памяти хранится статическая информация, долговременная память является динамической системой. От получения новой информации до постоянного хранения предпринимаются следующие основные шаги:

- кодирование (преобразование воспринимаемой информации и ввод ее в память);
- сохранение (первичное складирование после кодирования), хранение (в долговременной памяти),



- консолидация;
- хранение (в долговременной памяти);
- воспроизведение;
- перекодирование (рис. 4.10).

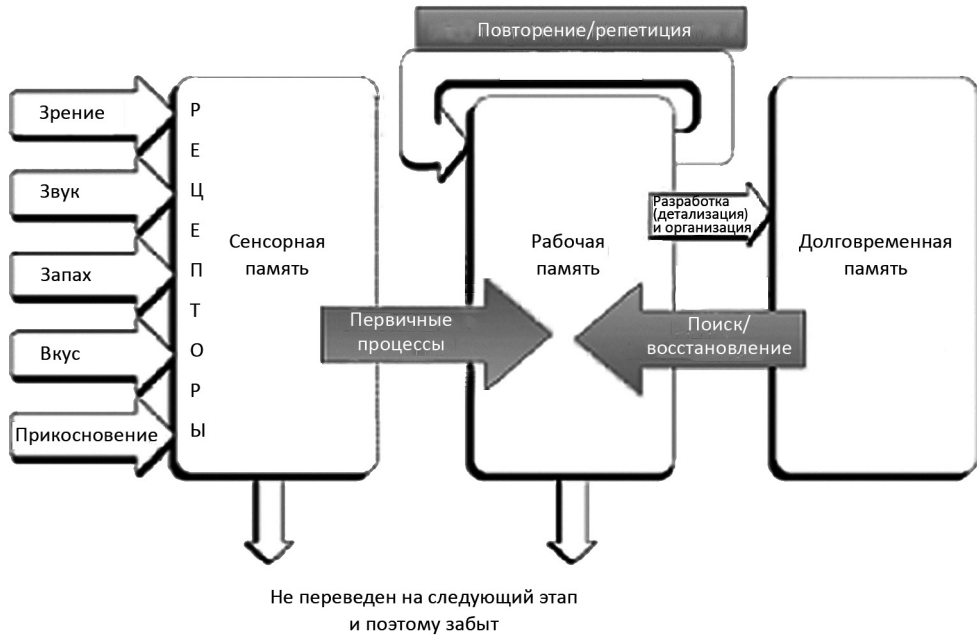


Рис. 4.10. Информационно-процессуальная модель [Wolfe, 2001]

Любое извлечение из долговременной памяти вызывает повторное декодирование, и, следовательно, перезаписывается обновленное содержание ранее сохраненной информации.

Соответственно, для каждого шага необходимо время и поддержание функций и механизмов «работы» мнемических процессов [Wolfe, 2001; Brand, Markowitsch, 2009].

- *Кодирование* происходит за счет активизации имеющихся знаний и компетенций. Учитель должен проверить имеющиеся знания и создать ассоциации с новой информацией, например, за счет вопроса, который вызывает любопытство.
- *Подготовка к запоминанию* осуществляется в виде небольшого обзора в начале урока или рассказа по теме, что помогает создать структурное представление о том, что будет сообщено.

- *Использование когнитивных эффектов:*
  - ✓ принцип первенства и свежести / новизны: соблюдение правильной последовательности (первая и последняя тема запоминаются лучше);
  - ✓ эффект модальности (мультимедиа): информация запоминается легче, когда имеет двойное кодирование (например, разговорный текст подкрепляется картинками). Каждый канал (в образовании преимущественно визуальный и аудиальный каналы) имеет ограничения по количеству перерабатываемой информации. Нагрузка на оба канала требует значительного напряжения когнитивных процессов, что может привести к когнитивной перегрузке. Таково наиболее частое ограничение в использовании мультимедийных презентаций в учебном процессе.
- *Структурирование и извлечение правил* может быть искусственно улучшено (форсировано) за счет большого количества примеров метода открытий и поискового обучения.
- *Дробность или фрагментарность материала:* группировка и категоризация незначительных по объему или незначимых по содержанию кусков материала, присоединение к более объемным смысловым единицам, облегчающим запоминание данных. Использование магического числа  $7 \pm 2$  ( $5 \pm 2$ ) при фрагментации.
- *Связь:* обучение всегда связывает новую информацию с имеющимися знаниями. Формирование этой связи может быть облегчено использованием мнемоники (например, чем смешнее, тем лучше) или встраиванием данных в контекст практического применения или личного опыта / смысла.
- *Консолидация:* после получения и обработки информации нужно время для бессознательного процесса консолидации (укрепления следа). Лучше всего она протекает в условиях самоорганизации. После обучения учащиеся должны переработать информацию в собственном ритме, сделать перерыв, когда им это необходимо.
- *Перекодирование.* При воспроизведении / воспоминании информации всегда происходит новое перекодирование и хранение обновленного варианта сохраненной ранее информации. Процесс может быть оптимизирован за счет механизма, реализующегося при кооперативных формах обучения (работа в команде, интервью) или при обучении преподаванием (объяснение и проверка другого). Важно следить за возникающими ошибками, чтобы вовремя устранить их и избежать сохранения ложной (деформированной) информации.

В качестве примера интеграции процессов памяти в классе можно привести модель обучения под самоконтролем, которую используют в двуязычной частной школе в Лихтенштейне. В этой концепции идеальный урок делится на шесть этапов:

- активация (10 минут): в начале несколько релаксационных упражнений подготавливают учащихся к учебному процессу, чтобы они сосредоточили внимание;
- презентация (5–10 минут): представление нового учебного материала: ключевых идей, основного содержания;
- консолидация I (5 минут): небольшой перерыв должен содействовать консолидации нового содержания;
- повторение I (5 минут): первоначальное повторение ключевой информации;
- консолидация II (10 минут): второй перерыв, способствующий консолидации повторенного содержания;
- повторение II (10 минут): второе (еще одно) повторение, которое должно привести к лучшему и более глубокому запоминанию, обработке и сохранению консолидированных следов в памяти [Theurl, 2009].

**Пример Б.** Опора на имеющиеся знания (соединение ранее изученного и нового материала, а также практико-ориентированность). При знакомстве с новой информацией ее активно оценивают на предмет смысла, эмоций и отношения (хорошая / старая / бессмысленная / плохая и т. д.). Очевидно, что мы лучше запоминаем то, что хорошо знакомо и значимо для нас. Соответственно, обучение идет более эффективно, когда мы знаем, почему мы это делаем, когда новая информация связана со старой. Таким образом, стоит начать новую тему с проверки имеющихся знаний. Задайте вопросы, которые могут вызвать любопытство.

В качестве примера приведем хороший урок (изучение новой темы), по крайней мере в области естественных наук.

Хотели бы вы купить компьютер? У тебя есть идеи, на что обратить внимание при покупке компьютера? Что мы можем на самом деле делать с компьютером? (Далее ученики получают рабочий лист со следующими инструкциями.) Ваши родители хотят купить компьютер или ноутбук, но не знают много о технологии (*практическая ориентация, путь к личному миру учащихся, личностному смыслу*). Они просят вас сравнить различные предложения и объяснить возможности, преимущества и недостатки (*обучение через преподавание, перекодирование*). Ваши родители также хотят, чтобы вы помогли им выбрать подходящее предложение (*социальный контекст, смысл*). Чтобы выбрать правильный компьютер/ноутбук, вы должны знать, конечно, как будет использоваться компьютер. Как ваши родители хотят использовать компьютер: работать на нем, писать или подсчитывать что-либо? Или им нравится живопись

(прослушивание музыки)? Или вы хотели бы использовать новый компьютер, чтобы записывать собственные песни? (*Прайминг — ввод — обработка — выход.*) Вы выбираете подходящее предложение, возможно, вам необходимо обсудить его с друзьями (*перекодирование*). Когда вы запишете его вместе со всей необходимой информацией (*интеграция современных знаний, личных интересов и талантов — учащиеся с более высоким уровнем знаний могут просто дать более подробную информацию о процессоре, объеме памяти и т. д.*), постарайтесь объяснить свой выбор родителям (*обучение через преподавание, перекодирование*) [Stern, 2009].

Для выполнения этих инструкций студентам потребуется реальный и разнообразный материал, например рекламные буклеты или сайты компьютерных магазинов. Если школа находится рядом с компьютерным магазином, лучшим выбором будет короткая учебная поездка туда (*практическая направленность*).

После знакомства с различными компонентами компьютеров и другим оборудованием обучающиеся должны выполнить вторую часть задания на листе.

Теперь вы уже видели некоторые предложения по компьютерам и другому оборудованию. Прежде чем объяснить их своим родителям и дать им советы, раскройте и опишите первую группу компонентов в соответствии с их функцией (*закрепление структурирование — переструктурирование*). Помните, что вы можете сделать с ними? (*Формулировка вопроса с целью стимулировать структурирование информации.*)

### **Как повлиять на процесс формирования знаний? Структурирование и категоризация**

**Пример А.** Если мозг является «машиной, извлекающей правила», то нужно как можно чаще использовать примеры, которые помогают распознавать и структурировать информацию. Наиболее часто такие подходы используются в поисковом и эвристическом обучении. Также в этом помогают технологии критического мышления и построение понятийных карт.

На рис. 4.11 показаны модели десятичных и двоичных чисел, с которыми учащиеся знакомятся в классе на уроках математики, информатики или компьютерной грамотности. Для младших школьников можно в качестве образца показать 2–3 примера с последующим объяснением на доске, что и как делает учитель. Для старших школьников не нужно объяснять способ расчета. Они способны обнаружить правила и структуру сами, исходя из примеров.

**Пример Б.** Связывание новой информации со старой формирует более прочные ассоциативные связи, чем при связывании нового с новым или старого со старым. Пример многоязычного словаря показывает, как можно повлиять на усвоение иностранного языка посредством междисциплинарных проектов.



циация). Эти экспертные группы должны были проанализировать, исправить, изменить свои темы, делая своими знаниями и компетенциями с другими членами группы.

Учитель выполнял пассивную роль инструктора: помогал или отвечал на возможные вопросы. После того как были сформированы первые языковые блоки, представитель от каждой группы экспертов еще раз просматривал блоки. Его задача состояла в том, чтобы помочь «коллегам по учению» улучшить / оптимизировать собственные темы (обучение преподаванию, повторное кодирование, повторное хранение). В результате должен был быть сформирован мультязычный словарь с поисковой формой (рис. 4.12), аналогичный словарю учителя.

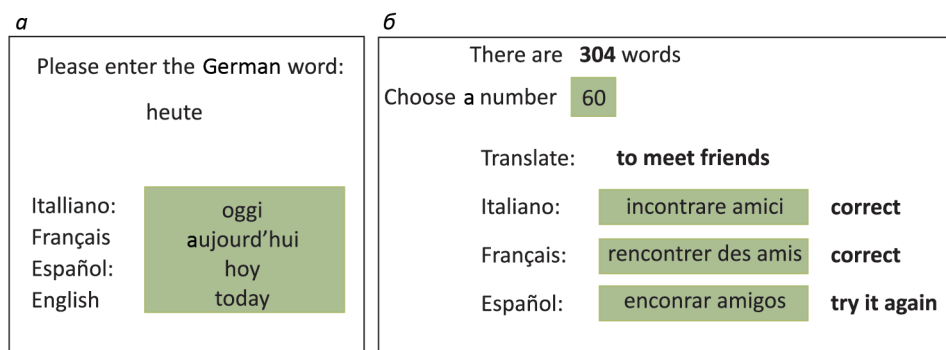


Рис. 4.12. МультILINGВИСТИЧЕСКИЙ словарь учащегося (исследовательская форма) (а) и словарь учителя (б) [Sabitzer, 2011, p. 5888]

Далее списки слов словаря вводятся в доступные базы данных. Пересматривая основные таблицы, формы и отчеты (с опорой на уже проверенные таблицы слов, их форм, отчеты о соответствии значений), обучающиеся создают поисковую форму на основе запроса, который ориентирован на введенное сверху слово на всех доступных из четырех языков [Sabitzer, 2011].

Приведенные примеры не только иллюстрируют построение занятий на основе закономерностей работы мозга, но и во многом подтверждают эффективность теорий и принципов прогрессивного обучения, уже использующегося в образовании. Мы привели их с целью еще раз показать, что мы не можем передавать знания. Последние должны быть вновь созданы в голове каждого ученика. Учитель должен стремиться активизировать врожденные функции мозга учащихся, чтобы обучение шло максимально эффективно.

## Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте этапы становления речи у ребенка.
2. Каковы общие и специфические нейрофизиологические механизмы формирования лингвистических и математических умений?

3. Дайте характеристику нейропсихологическим основам речи.
4. Раскройте специфику нейрофизиологических механизмов чтения и письма.
5. В чем заключаются нейрофизиологические механизмы математических умений?
6. Предложите меры для того, чтобы повысить эффективность образовательного процесса с учетом принципов обучения, ориентированного на мозг, и полученных сведений о нейрофизиологических механизмах развития речи, обучения чтению, письму, математике.

### Использованная литература

1. *Dehaene S., Cohen L.* The unique role of the visual word form area in reading // Trends in Cognitive Sciences. 2011. Vol. 15, No. 6. P. 254–262.
2. *Feigenson L., Dehaene S., Spelke E.* Core systems of number // Trends in Cognitive Sciences. 2004, Vol. 8, No. 7. P. 307–314.
3. *Kuhl P.K.* Brain mechanisms in early language acquisition // Neuron. 2010. Vol. 67, No. 9. P. 713–727.
4. *Rapcsak S. Z., Beeson P. M., Henry M. L. et al.* Phonological dyslexia and dysgraphia: cognitive mechanisms and neural substrates // Cortex. 2009. No. 45. P. 575–591.
5. Reading, Writing, Mathematics and the Developing Brain: Listening to Many Voices / eds by Z. Breznitz, O. Rubinsten, V. J. Molfese et al. New York: Springer Publications, 2012. 324 p.
6. *Zamarian L., Ischebeck A., Delazer M.* Neuroscience of learning arithmetic — evidence from brain imaging studies // Neuroscience and Biobehavioral Reviews. 2009. No. 33. P. 909–925.

## Заключение

Современные достижения в области нейронауки открывают новые возможности в построении эффективных программ обучения. Понимание того, как функционирует мозг, каковы нейрофизиологические механизмы усвоения, хранения и переработки информации, как сам процесс обучения влияет на структурно-функциональную организацию нейрональных сетей, позволяет выстраивать образовательную практику с учетом имеющейся в науке доказательной базы, учитывающей верифицированные результаты исследований.

Сложный характер образовательной практики означает, что необходимо провести междисциплинарные исследования с целью сформировать комплексное знание о наиболее важных результатах процесса обучения: знаниях, сложных умственных умениях, компетенциях, творчестве, креативности, способности принимать решение в условиях неопределенности и т. д. Исследования, объединяющие основные принципы и результаты экспериментов из нейронауки, психологии и образования, позволяют приблизиться к разработке принципиально нового программного обеспечения и образовательных инструментов для эффективного обучения чтению, письму, математике, преодоления типичных школьных трудностей, а также проблем дислексии, дискалькулии, дисграфии и т. д. Они указывают направление возможного прогресса и инноваций в образовании, одновременно транслируя наиболее значимые научные результаты (трансляционное образование) и формируя условия для научно-доказательной образовательной практики.

Одним из многообещающих направлений является анализ нейрофизиологического потенциала общих способностей, умственных действий сложных видов (усвоения, планирования, контроля, моделирования и др.), которые являются наиболее значимой составляющей образовательной практики, развитие исполнительных функций, выступающих нейрофизиологическим основанием формирования универсальных учебных действий — ключевого звена умения учиться.



## Литература

1. *Александров Ю. И.* Психофизиология. СПб.: Питер, 2007. 464 с.
2. *Анохин П. К.* Избранные труды: Кибернетика функциональных систем. М.: Медицина, 1998. 400 с.
3. *Асмолов А. Г., Бурменская Г. В., Володарская И. А. и др.* Проектирование универсальных учебных действий в старшей школе // Национальный психологический журнал. 2011. Т. 5, № 1. С. 104–110.
4. *Бабский Е. Б., Зубков А. А., Косицкий Г. И. и др.* Физиология человека. М.: Медицина, 1966. 656 с.
5. *Балашова Ю. В.* Когнитивные и личностные особенности студентов очного и дистанционного обучения: автореф. дис. ... канд. психол. наук: 19.00.01. М., 2011. 24 с.
6. *Бехтерева Н. П.* Нейрофизиологические аспекты психической деятельности человека. Л.: Наука, 1971.
7. *Болдырева Г. Н., Манелис Н. Г., Скорятина И. Г. и др.* Межцентральные отношения электрических процессов мозга человека при вовлечении в патологический процесс лимбических структур // Физиология человека. 1997. Т. 23, № 2. С. 42–49.
8. *Гамезо М. В., Домашенко И. А.* Атлас по психологии. М.: Педагогическое общество России, 2001. 276 с.
9. *Гамезо М. В., Петрова Е. А., Орлова Л. М.* Возрастная и педагогическая психология: учеб. пособие для студ. всех специальностей пед. вузов. М.: Педагогическое общество России, 2003. 512 с.
10. *Гиляревский С. А., Тарасов К. Е.* Диалектический материализм и медицинская диагностика. М.: Медицина, 1973. 248 с.
11. *Гнедых Д. С.* Эффективность усвоения учебной информации студентами в условиях электронного обучения: автореф. дис. ... канд. психол. наук. СПб., 2015. 25 с.
12. *Гогошидзе Т. Ш.* Исследование логического мышления у больных до и после 142 стереотаксической криоталамотомии вентролатерального ядра таламуса // Изв. АН ГССР. 1984. № 1. С. 73–80.
13. *Годфруа Ж.* Что такое психология: в 2 т. М.: Мир, 1996. Т. 1. 496 с.; Т. 2. 376 с.
14. *Давыдов В. В.* Проблемы развивающего обучения. М.: Педагогика, 1986. 240 с.
15. *Давыдов В. В., Слободчиков В. И., Цукерман Г. А.* Младший школьник как субъект учебной деятельности // Вопросы психологии. 1992. № 3–4. С. 14–19.
16. *Давыдов В. В., Маркова А. К.* Концепция учебной деятельности школьников // Вопросы психологии. 1981. № 6. С. 13–26.

17. Данилова Н. Н. Психофизиология. М.: Аспект-Пресс, 2004. 368 с.
18. Данилова Н. Н., Крылова А. Л. Физиология высшей нервной деятельности. М.: Учебная литература, 1997. 322 с.
19. Денисова О. Д. К вопросу о нейрофизиологической организации процесса чтения и ее учете при обучении чтению // Теория и практика общественного развития. 2013. № 7. С. 100–103.
20. Дефектология: Словарь-справочник / авт.-сост. С. С. Степанов; под ред. Б. П. Пузанова. М.: Новая школа, 1996. 80 с.
21. Дзугаева С. Б. Проводящие пути головного мозга человека (в онтогенезе). М.: Медицина, 1975. 254 с.
22. Дубровинская Н. В., Фарбер Д. А., Безруких М. М. Психофизиология ребенка: Психофизиологические основы детской валеологии: учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. М.: Гуманит. изд. центр «Владос», 2000. 144 с.
23. Жуков Д. А. Биология поведения. Гуморальные механизмы. СПб.: Речь, 2007. 443 с.
24. Загородний Е. С. Принципы работы мозга. М.: КомКнига, 2006. 176 с.
25. Как проектировать универсальные учебные действия в начальной школе: от действия к мысли: пособие для учителя / А. Г. Асмолов, Г. В. Бурменская, И. А. Володарская и др.; под ред. А. Г. Асмолова. М.: Просвещение, 2008. 151 с.
26. Корсакова Н. К., Московичюте Л. И. Подкорковые структуры мозга и психические процессы. М.: МГУ, 1985. 119 с.
27. Костромина С. Н. Коммуникативная компетентность педагога как фактор успешности диагностической деятельности // Психологическая наука и образование. 2007а. № 3. С. 77–86.
28. Костромина С. Н. Психология диагностической деятельности в образовании. СПб.: Наука, 2007б.
29. Костромина С. Н., Бордовская Н. В., Искра Н. Н. и др. Нейронаука, психология и образование: проблемы и перспективы междисциплинарных исследований // Психологический журнал. 2015. Т. 36, № 4. С. 61–70.
30. Костромина С. Н., Гнедых Д. С. Электронный визуальный ряд как современное средство наглядности в обучении // Теоретические и методологические проблемы современного образования: матер. XI Междунар. науч.-практ. конф. (26–27 декабря 2012 г.): в 2 т. / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». М.: Спецкнига, 2012. Т. 1. С. 194–196.
31. Костромина С. Н., Дворникова Т. А. Учебные стратегии как средство организации самостоятельной работы студентов // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 6. Философия. Политология. Социология. Психология. Право. Международные отношения. 2007. Вып. 4. С. 273–278.
32. Краснощекова Е. И. Модульная организация нервных центров. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2008. 130 с.
33. Кропотов Ю. Д. Количественная ЭЭГ, когнитивные вызванные потенциалы мозга человека и нейротерапия. Донецк: Заславский А. Ю., 2010. 512 с.
34. Кучма В. Р., Текшева Л. М., Вятлева О. А. и др. Особенности восприятия информации с электронного устройства для чтения (ридера) // Вопросы школьной и университетской медицины и здоровья. 2012. № 1. С. 39–46.

35. Лалаева Р.И., Гермаковска А. Нарушения в овладении математикой (дискалькулии) у младших школьников. Диагностика, профилактика и коррекция: учеб.-метод. пособие. СПб.: Союз, 2005. 176 с.
36. Латанов А.В. Психофизиология чтения. М.: МГУ, 2013. URL: [http://www.neurobio-tech.ru/sites/default/files/docs/Psy\\_reading\\_Latanov.pdf](http://www.neurobio-tech.ru/sites/default/files/docs/Psy_reading_Latanov.pdf).
37. Лернер И.Я. Процесс обучения и его закономерности. М.: Знание, 1980. 96 с.
38. Лурия А.Р. Нейропсихология памяти: в 2 т. М., 1974–1976. Т. 1. 1974.
39. Лурия А.Р. Основные проблемы нейролингвистики. 3-е изд. М.: Либроком, 2009. 256 с. (Сер.: Из наследия мировой психологии).
40. Московичюте Л.И., Кадин А.Л. К вопросу о латерализации психических функций на уровне подкорковых образований // Журн. невропатол. и психиат. 1975. Т.75, № 11. С.1665–1670.
41. Московичюте Л.И., Симерницкая Э.Г., Смирнов Н.А. и др. О роли мозолистого тела в организации высших психических функций // А.Р.Лурия и современная психология / под ред. Е.Д.Хомской, Л.С.Цветковой, Б.В.Зейгарник. М.: МГУ, 1982. С.143–150.
42. Наатанен Р. Внимание и функции мозга. М.: МГУ, 1998. 600 с.
43. Найдены истребители лишних связей в мозге [2013] // NanoNewsNet. URL: <http://www.nanonewsnet.ru/news/2013/naideny-istrebiteli-lishnikh-svyazei-v-mozge>.
44. Отростки нейронов оказались способны самостоятельно обрабатывать информацию [2013] // NanoNewsNet. URL: <http://old.nanonewsnet.ru/news/2013/otrostki-neironov-okazalis-sposobny-samostoyatelno-obrabatyvat-informatsiyu>.
45. Павлов И.П. Двадцатилетний опыт объективного изучения высшей нервной деятельности животных. М.; Пг.: Государственное издательство, 1925. 360 с.
46. Пушина Н.П. Возрастные и индивидуальные различия в развитии произвольного контроля поведения (контроль дотягивания, рабочая память) у детей-близнецов 7–12 месяцев жизни: дис. ... канд. психол. наук. М., 2005. 155 с.
47. Роберт И. Современные информационные технологии в образовании: дидактические проблемы; перспективы использования. М.: Школа-Пресс, 1994. 140 с.
48. Рысина Н.Н., Грибанов А.В. Понятие о дискалькулии: психофизиологические аспекты развития (обзор) // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Сер. Естественные науки. 2011. Вып. 1. С.77–88.
49. Свидерская Н.Е., Королькова Т.А., Николаева Н.О. Психофизиологическая структура интеллектуальных действий человека // Психологический журнал. 1994. Т. 15, № 2. С. 85–93.
50. Семенова О.В., Мачинская Р.И., Ахутина Т.В. и др. Мозговые механизмы произвольной регуляции деятельности и формирование навыка письма у детей 7–8 лет // Физиология человека. 2001. Т. 27, № 4. С. 23–30.
51. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека. М.: Медицина, 1981. 400 с.
52. Синельников Р.Д., Синельников Я.Р. Атлас анатомии человека: в 2 т. М.: Медицина, 1981. Т. 1. 344 с.
53. Скороходова Т.А. Функциональная организация интегративной деятельности мозга у детей младшего школьного возраста с разным уровнем интеллектуального развития: дис. ... канд. биол. наук. М., 2001. 203 с.
54. Смирнов В.М. Стереотаксическая неврология. Л.: Медицина, 1976. 264 с.

55. Тылевич И. М., Немцева А. Я. Руководство по медицинской психологии. Л.: Медицина, 1980. 224 с.
56. Ухтомский А. А. Доминанта. СПб.: Питер, 2002. 448 с.
57. Ушинский К. Д. Человек как предмет воспитания // Педагогические сочинения: в 6 т. / сост. С. Ф. Егоров. М.: Педагогика, 1990. Т. 5. 528 с.
58. Хомская Е. Д. Нейропсихология. СПб.: Питер, 2006. 496 с.
59. Хомская Е. Д., Гогошидзе Т. Ш. Нейропсихологическое исследование наглядно-образного мышления // Вопросы психологии. 1983. № 4. С. 119–127.
60. Хохлова Л. А. Функциональные особенности частотных диапазонов мозга у студентов с разным уровнем языковых способностей // Психология образования в поликультурном пространстве. 2011. Т. 1, № 13. С. 86–93.
61. Цукерман Г. А. Совместная учебная деятельность как основа формирования умения учиться: автореф. дис. ... д-ра психол. наук. М., 1992. 39 с.
62. Шишкин С. Л. Исследование синхронности моментов резких изменений альфа-активности ЭЭГ человека: автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1997. 31 с.
63. Шульговский В. В. Основы нейрофизиологии: учеб. пособие для студентов вузов. М.: Аспект-Пресс, 2000. 277 с.
64. Эльконин Д. Б. Избранные психологические труды. М.: Педагогика, 1989. 560 с.
65. Эльконин Д. Б. Психологические вопросы формирования учебной деятельности в младшем школьном возрасте // Вопросы психологии обучения и воспитания / под ред. Г. С. Костюка, П. Р. Чаматы. Киев: Радянська школа, 1961. С. 12–13.
66. Эльконин Д. Б. Психология обучения младшего школьника. М., 1974. 64 с.
67. A Taxonomy for Learning, Teaching, and Assessing: A Revision of Bloom's Taxonomy of Educational Objectives / eds. L. W. Anderson, D. Krathwohl, P. Airasian. Boston, MA: Allyn & Bacon, 2001.
68. Anderson O. R. Neurocognitive Bases for Constructivism in Education // Paper presented at the meeting of the International Conference on Thinking and Education. Ponce; Puerto Rico, 1999. P. 67–79.
69. Ardila A., Surloff C. Dysexecutive syndromes. Medlink Neurology. San Diego: Arbor Publishing Co, 2004.
70. Baddeley A. D., Hitch G. Working memory // The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory / ed. G. H. Bower. New York: Academic Press, 1974. P. 47–89.
71. Baroody A. J. Mastery of basic number combinations: Internalization of relationships of facts? // Journal for Research in Mathematics Education. 1985. No. 16. P. 83–98.
72. Belsh J. M., Chokroverty S., Barabas G. Posterior rhythmic slow activity in EEG after eye closure // Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol. 1983. Vol. 56, No. 6. P. 562–568.
73. Bergman Å., Andersson A. M., Becher G. et al. Science and policy on endocrine disrupters must not be mixed: a reply to a "common sense" intervention by toxicology journal editors // Environ Health. 2013. Vol. 12. P. 69.
74. Bernier A., Carlson S. M., Whipple N. From External Regulation to Self-Regulation: Early Parenting Precursors of Young Children's Executive // Functioning. Child Development. 2010. Vol. 81, No. 1. P. 326–339.
75. Bierwisch M. Language and Brain — Facts, Problems, Mysteries // Eur. Rev. 2008. Vol. 16, No. 4. P. 467–481.

76. Blair C., Razza R.P. Relating effortful control, executive function, and false belief understanding to emerging math and literacy ability in kindergarten // *Child Dev.* 2007. Vol. 78, No. 2. P. 647–663.
77. Borkowski J.G., Burke J.E. Theories, models, and measurements of executive functioning: An information processing perspective // *Attention, memory, and executive function* / eds G.R. Lyon, N.A. Krasnegor. Baltimore, MD: Paul H. Brookes Publishing, 1996. P. 235–261.
78. Brand M., Markowitsch H.J. Lernen und Gedächtnis aus neurowissenschaftlicher Perspektive — Konsequenzen für die Gestaltung des Schulunterrichts // *Neurodidaktik: Grundlagen und Vorschläge für gehirngerechtes Lehren und Lernen* / Hrsg. U. Herrmann. Weinheim; Basel: Beltz, 2009. S. 69–85.
79. Bruer J.T. Education and the brain: a bridge too far // *Educational Research.* 1997. No. 26. P. 4–16.
80. Bryck R., Fisher P. Training the Brain // *American Psychologist.* 2012. Vol. 67, No. 2. P. 87–100.
81. Bull R., Espy K.A., Wiebe S.A. et al. Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: sources of variation in emergent mathematic achievement // *Dev. Sci.* 2011. Vol. 14. P. 679–692.
82. Bunge S.A., Zelazo P.D. A Brain-Based Account of the Development of Rule Use in Childhood // *Current Directions in Psychological Science.* 2006. Vol. 15, No. 3. P. 118–121.
83. Byrnes J.P. *Minds, Brains and Learning.* New York: Guilford Press, 2001. 214 p.
84. Caine G., Caine R.N. *Strengthening and enriching your professional learning community. The art of learning together.* Alexandria, VA: Association for Supervision and Curriculum Development, 2010. 208 p.
85. Caine R., Caine G. *Teaching and the human brain.* Alexandria: Association for Supervision and Curriculum Development [1991] // Caine Learning Center. Overview of the Systems Principles of Natural Learning: in 3 vols. Vol. 1. URL: [www.cainelearning.com](http://www.cainelearning.com).
86. Caine R.N., McClintic C. *12 Brain/Mind Learning Principles in Action: Developing Executive Functions of the Human Brain.* London: SAGE Publications, 2009. 282 p.
87. Calkins S.D., Johnson M.C. Toddler regulation of distress to frustrating events: Temperamental and maternal correlates // *Infant Behavior and Development.* 1998. Vol. 21. P. 379–395.
88. Cartwright S. Individual response to mergers and acquisitions // *The handbook of mergers and acquisitions* / eds D. Faulkner, S. Teerikangas, R. J. Joseph. Oxford University Press, 2012. P. 372–391.
89. Casey B.J., Trainor R., Giedd J. et al. The role of the anterior cingulate in automatic and controlled processes: A developmental neuroanatomical study // *Developmental Psychobiology.* 1997. Vol. 30, No. 1. P. 61–69.
90. Chen N., Sugihara H., Sharma J. et al. Nucleus basalis-enabled stimulus-specific plasticity in the visual cortex is mediated by astrocytes // *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 2012. Vol. 109, No. 41. P. 2832–2841.
91. Chung W.-S., Clarke L.E., Wang G.X. et al. Astrocytes mediate synapse elimination through MEGF10 and MERTK pathways // *Nature.* 2013. Vol. 504. P. 394–400.
92. Chuvgunova O., Kostromina S. Planning as a learning skill of students // *Procedia-Social and Behavioral Sciences.* 2016. Vol. 217. P. 132–138.

93. *Cohen I., Goldsmith M.* Hands On: How to Use Brain Gym® in the Classroom. Ventura, CA: Edu-Kinesthetics. 2000. 105 p.
94. *Cohen L., Lehéricy S., Chochon F. et al.* Language-Specific Tuning of Visual Cortex? Functional Properties of the Visual Word Form Area // *Brain*. 2002. Vol. 125, No. 5. P.1054–1069.
95. *Collette F., van der Linden M., Laureys S. et al.* Exploring the unity and diversity of the neural substrates of executive functioning // *Hum Brain Mapp*. 2005. Vol.25, No. 4. P.409–423.
96. *Collins A., Koehlin E.* Reasoning, learning, and creativity: Frontal lobe function and human decision-making // *PLoS Biology*. 2012. Vol. 10, No. 3. P.e1001293.
97. *Coulson S., Federmeier K.D., van Petten C. et al.* Right hemisphere sensitivity to word- and sentence-level context: Evidence from event-related brain potentials // *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*. 2005. Vol. 31. P. 129–147.
98. *Crinion J., Turner R., Grogan A. et al.* Language Control in the Bilingual Brain // *Science*. 2006. Vol. 312, No. 5779. P. 1537–1540.
99. *Csikszentmihalyi M.* Flow: The psychology of optimal experience. New York: Harper Perennial, 1991. 336 p.
100. *Cuevas K., Bell M. A.* EEG and ECG from 5 to 10 month of age: Developmental change in baseline activation and cognitive processing during a working memory task // *International Journal of Psychophysiology*. 2011. Vol. 80. P. 119–128.
101. *De Smedt B., Ansari D., Grabner R. H. et al.* Cognitive neuroscience meets mathematics education: It takes two to Tango // *Educational Research Review*. 2011. Vol.6, No. 3. P.232–237.
102. *Dehaene S., Changeux J.P., Naccache L. et al.* Conscious, preconscious, and subliminal processing: a testable taxonomy // *Trends Cogn. Sci.* 2006. Vol. 10. P.204–211.
103. *Dehaene S., Cohen L.* The unique role of the visual word form area in reading // *Trends in Cognitive Sciences*. 2011. Vol. 15, No. 6. P.254–262.
104. *Dehaene S., Naccache L., Cohen L. et al.* Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming // *Nat. Neurosci.* 2001. Vol. 4. P.752–758.
105. *Dehaene S., Piazza M., Pinel P. et al.* Three parietal circuits for number processing // *Cognitive neuropsychology*. 2003. Vol. 20, No. 3–6. P. 487–506.
106. *Delazer M., Ischebeck A., Domahs F. et al.* Learning by strategies and learning by drill — evidence from an fMRI study // *NeuroImage*. 2005. Vol. 25, No. 3. P.838–849.
107. *Delis D.C., Kaplan E., Kramer J.H.* Examiner's Manual of the Delis-Kaplan Executive Functioning System. San Antonio: The Psychological Corporation, 2001.
108. *Deng W., Aimone J.B., Gage F.H.* New neurons and new memories: How does adult neurocampal neurogenesis affect learning and memory? // *Nature Reviews Neuroscience*. 2010. Vol. 11, No. 5. P. 339–350.
109. *DeSmedt B., Ansari D., Grabner R. H. et al.* Cognitive neuroscience meets mathematics education // *Educational Research Review*. 2010. Vol. 5, No. 1. P.97–105.
110. *Diamond A.* Executive functions // *Annual Review of Psychology*. 2013. Vol. 64. P. 135–168.
111. *Diamond A., Barnett W.S., Thomas J. et al.* Preschool Program Improve Cognitive Control // *Science*. 2007. Vol. 318 (5855). P. 1387–1388.

112. *Diamond A., Lee K.* Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old // *Science*. 2011. Vol. 333. P. 959–964.
113. *Diamond A., Taylor C.* Development of an aspect of executive control: development of the abilities to remember what I said and to “do as I say, not as I do” // *Developmental Psychology*. 1996. Vol. 29, No. 4. P. 315–334.
114. *Donchin E.* Surprise! Surprise // *Psychophysiology*. 1981. Vol. 18, No. 5. P. 493–513.
115. *Drenhaus H., beim Graben P., Frisch St. et al.* On the interaction between pragmatics and syntax: When a Negative Polarity Item is not licensed. *Experimental Pragmatics: Exploring the Cognitive Basis of Conversation*, Cambridge, 2005.
116. *Dubinsky J. M., Roehrig G., Varma S.* Infusing neuroscience into teacher professional development // *Educational Researcher*. 2013. Vol. 42, No. 6. P. 317–329.
117. *Duman B.* The Effects of Brain-Based Learning on the Academic Achievement of Students with Different Learning Styles // *Educational Science: Theory & Practice*. 2010. Vol. 10, No. 4. P. 2077–2103.
118. Early Child Care Research Network / National Institute of Child Health and Human Development. U. S. Department of Health and Human Services. [S.l.,] 2005. 474 p.
119. *Ellis A. W.* Spelling and writing (and reading and speaking) // *Normality and Pathology in Cognitive Functions* / ed. F. W. Ellis. London: Academic Press, 1982.
120. *Espy K. A., McDiarmid M. D., Cwik M. F. et al.* The contributions of executive functions to emergent mathematic skills in preschool children // *Developmental Neuropsychology*. 2004. Vol. 26. P. 465–486.
121. *Evans C. C.* Comments on “occipital sharp waves responsive to visual stimuli” // *Electroencephal. Clin. Neurophysiol.* 1952. Vol. 4. P. 111.
122. *Evarts E. V., Shinoda Y., Wise S.* Neuropsychological approach to higher brain function. New York: J. Wileyand Sons, 1984. 208 p.
123. *Fedorenko E., Nieto-Castañón A., Kanwisher N.* Lexical and syntactic representations in the brain: An fMRI investigation with multi-voxel pattern analyses // *Neuropsychologia*. 2012. Vol. 50. P. 499–513.
124. *Feigenson L., Dehaene S., Spelke E.* Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*. 2004. Vol. 8, No. 7. P. 307–314.
125. *Fischer K. W., Bidel T. R.* Dynamic development of action, thought, and emotion // *Handbook of child psychology: Theoretical models of human development* / eds. W. Damon, K. M. Lerner. New York: Wiley, 2006. Vol. 1. P. 313–399.
126. *Fischer K. W., Daley S. G.* Connecting Cognitive Science and Neuroscience to Education: Potentials and Pitfalls in Inferring Executive Processes // *Understanding executive function: Implications and opportunities for the classroom* / ed. L. Meltzer. New York: Guilford. 2006. P. 55–72.
127. *Fischer K. W., Rose S. P.* Dynamic growth cycles of brain and cognitive development // *Developmental neuroimaging: Mapping the development of brain and behavior* / eds K. Thatcher, G. K. Lyon, J. Rumsey et al. New York: Academic Press, 1996. P. 263–279.
128. *Friedrich M., Friederici A. D.* Early N400 development and later language acquisition // *Psychophysiology*. 2006. Vol. 43, No. 1. P. 1–12.
129. *Frost R.* Towards a universal model of reading // *Behavioral and brain sciences*. 2012. Vol. 35, No. 5. P. 263–329.

130. *Gastaut Y.* Un signe électroencephalographique peu connu: Les pointes occipitales survenant pendant l'ouverture des yeux // *Rev. Neurol. (Paris)*. 1951. Vol. 84. P.640–643.
131. *Gathercole S. E., Alloway T. P.* Working memory and learning: A practical guide. Los Angeles, CA: Sage Publications, 2008. 124 p.
132. *Gathercole S. E., Brown L., Pickering S. J.* Working memory assessments at school entry as longitudinal predictors of National Curriculum attainment levels // *Educational and Child Psychology*. 2003. Vol. 20, No. 3. P.109–122.
133. *Gathercole S. E., Pickering S. J.* Assessment of working memory in six- and seven-year old children // *Journal of Educational Psychology*. 2000b. Vol. 92. P.377–390.
134. *Gathercole S. E., Pickering S. J.* Working memory deficits in children with low achievements in national curriculum at seven years of age // *British Journal of Educational Psychology*. 2000a. Vol. 70. P.177–194.
135. *Gathercole S. E., Pickering S. J., Knight C. et al.* Working memory skills and educational attainment: Evidence from national curriculum at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*. 2004. Vol. 40. P.1–16.
136. *Gazzaniga M. S.* The cognitive neurosciences III. Cambridge, MA: MIT Press, 2004. 1294 p.
137. *Gogtay N., Giedd J. N., Lusk L. et al.* Dynamic mapping of human cortical development during childhood through early adulthood // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2004. Vol. 101, No. 21. P.8174–8179.
138. *Goswami U.* Neuroscience and Education // *British Journal of Educational Psychology*. 2004. No. 74. P.1–14.
139. *Goswami U.* Neuroscience and education: from research to practice? // *Nature Review Neuroscience*. 2007. No. 7. P.406–413.
140. *Gropen J., Clark-Chiarelli N., Hoisington C. et al.* The importance of executive function in early science education // *Child Development Perspectives*. 2011. Vol. 5. P.298–304.
141. *Hackman D. A., Farah M. J.* Socioeconomic status and the developing brain // *Trends in Cognitive Sciences*. 2008. Vol. 13, No. 2. P.65–73.
142. *Hagger M. S., Wood C., Stiff C. et al.* Ego Depletion and the Strength Model of Self-Control: A Meta-Analysis // *Psychological Bulletin*. 2010. Vol. 136. P.495–525.
143. *Hagoort P., Baggio G., Willems R. M.* Semantic unification // *The cognitive neurosciences* / ed. M. S. Gazzaniga. 4<sup>th</sup> ed. Cambridge, MA: MIT Press, 2009. P.819–836.
144. *Hall J.* Neuroscience and education: A review of the contribution of brain science to teaching and learning // *Scottish Council for Research in Education*. 2005. Vol. 29. URL: <http://www.scre.ac.uk>.
145. *Harman C., Rothbart M. K., Posner M. I.* Distress and attention interactions in early infancy // *Motivation and Emotion*. 1997. Vol. 21. P.27–43.
146. *Hattie J. A.* Visible Learning for Teachers: Maximizing Impact on Learning. New York: Routledge, 2011. 286 p.
147. *Hattie J. A.* Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. London: Routledge, 2008. 392 p.
148. *Hattie J.* Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement. London; New York: Taylor & Francis, 2009. 382 p.



149. *Haxby J. V., Ungerleider L. G., Horwitz B. et al.* Hemispheric differences in neural systems for face working memory: A PET-rCBF study // *Human Brain Mapping*. 1995. Vol. 3, No. 2. P.68–82.
150. *Hebb D.* The Organization of Behavior. NewYork: Willey, 1949. 335 p.
151. *Hillis A. E., Caramazza A.* The graphemic buffer and attentional mechanisms // *Brain & Language*. 1989. Vol. 36. P.208–235.
152. *Hodgson C, Denehy L., Ntoumenopolous G.* An investigation of the early effects of manual lung hyperinflation in critically ill patients. *Anaesthesia and Intensive Care*. 2000. Vol. 28. P.255–261.
153. *Indefrey P, Levelt W.J.M.* The Spatial and Temporal Signatures of Word Production Components // *Cognition*. 2004. Vol. 92. P.101–144.
154. *Jarvis H. L., Gathercole S. E.* Verbal and non-verbal working memory and achievements on national curriculum tests at 11 and 14 years of age // *Educational and Child Psychology*. 2003. Vol. 20. P.123–140.
155. *Jasper H. H., Andrews H. L.* Electroencephalography. III. Normal differentiation of occipital and precentral regions in man // *Archives of Neurology & Psychiatry*. 1938. Vol. 39. P.96–115.
156. *Jeanerod M.* Language, Perception and Action. How Words Are Grounded in the Brain // *European Review*. 2008. Vol. 16, No. 4. P.389–398.
157. *Katanoda K., Yoshikawa K., Sugishi M.* A functional MRI study on the neural substrates for writing // *Human Brain Mapping*. 2001. Vol. 13. P.34–42.
158. *Keller D., Barreiro D. L., Queiroz M. et al.* Anchoring in ubiquitous musical activities // *Proceedings of the International Computer Music Conference*. Ann Arbor, MI: MPublishing, University of Michigan Library, 2010. P.319–326.
159. *Keller A. A., Wang H., Zhou D. et al.* Stability and aggregation of metaloxide nanoparticles in natural aqueous matrices // *Environmental Science and Technology*. 2010. Vol. 44, No. 6. P.1962–1967.
160. *Khader P., Rösler F.* EEG Power and Coherence Analysis of Visually Presented Nouns and Verbs Reveals Left Frontal Processing Differences // *Neurosci. Lett*. 2004. Vol. 354, No. 2. P.111–114.
161. *Kim K. H., Kim J. H.* Analysis of Induced Gamma-Band Activity in EEG During Visual Perception of Korean, English, Chinese Words // *Neuroscience. Lett*. 2006. Vol. 403, No. 3. P.216–221.
162. *Kim K. H. S., Relkin N. R., Lee K.-M. et al.* Distinct Cortical Areas Associated with Native and Second Languages // *Nature*. 1997. Vol. 388. P.171–174.
163. *King J. W., Kutas M.* Who Did What and When? Using Word- and Clause-Level ERPs to Monitor Working Memory Usage in Reading // *J. Cogn. Neurosci*. 1995. Vol. 7, No. 3. P.376–395.
164. *Kliegl R., Dambacher M., Dimigen O. et al.* Eye Movements and Brain Electric Potentials During Reading // *Psychol. Res*. 2012. Vol. 76, No. 2. P.145–158.
165. *Kolb A. Y., Kolb D. A.* Learning styles and learning spaces: Enhancing learning in higher education // *Academy of Management Learning and Education*. 2005. Vol. 4, No. 2. P.193–212.

166. *Kraus J.* Was hat Bildung mit Gehirnforschung zu tun. Schule zwischen neurobiologischer Vision und bodenständiger Pädagogik // *Lernen und Gehirn / Hrsg. R. Caspary. Freiburg im Breisgau [u.a.]: Herder, 2008. S. 142–156.*
167. *Kugler J.* *Electroencephalography in Clinic and Praxis.* Stuttgart: Thieme, 1981.
168. *Kugler J., Laub M.* “Puppet show” theta rhythm // *Electroencephal. Clin. Neurophysiol.* 1971. Vol. 31. P. 532–533.
169. *Kuhl P.K.* Brain mechanisms in early language acquisition // *Neuron.* 2010, Vol. 67, No. 9. P. 713–727.
170. *Kutas M., Federmeier K.D.* Electrophysiology reveals semantic memory use in language comprehension // *Trends in Cogn. Sci.* 2000. Vol. 4. P. 463–470.
171. *Lafleche G., Albert M. S.* Executive Function Deficits in Mild Alzheimer’s Disease // *Neuropsychology.* 1995. Vol. 9, No. 3. P. 313–320.
172. *Laugier H., Liberson W. T.* Contribution à l’étude de l’EEG humain // *C. R. Soc. Biol. (Paris,* 1937. Vol. 125. P. 13–17.
173. *Lee K. M.* Cortical areas differentially involved in multiplication and subtraction: a functional magnetic resonance imaging study and correlation with a case of selective acalculia // *Annals of Neurology.* 2000. Vol. 48, No. 4. P. 657–661.
174. *Lehto J.E., Juujärvi P., Kooistra L. et al.* Dimensions of executive functioning: Evidence from children // *British Journal of Developmental Psychology.* 2003. Vol. 21, No. 1. P. 59–80.
175. *Levy B. J., Wagner A. D.* Cognitive control and right ventrolateral prefrontal cortex: reflexive reorienting, motor inhibition, and action updating // *Ann N. Y. Acad Sci.* 2011. Vol. 1224. P. 40–62.
176. *Lewis M. D., Todd R. M.* Getting emotional — A neural perspective on emotion, intention, and consciousness // *Journal of Consciousness Studies.* 2005. Vol. 12. P. 210–235.
177. *Lezak M. D.* *Neuropsychological Assessment.* 2<sup>nd</sup> ed. New York: Oxford University Press, 1983.
178. *Longcamp M., Anton J.L., Roth M. et al.* Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing // *NeuroImage.* 2003. Vol. 19. P. 1492–1500.
179. *Luht L., Bramham J., Morris R. G. et al.* Prefrontal cortex dysfunction and ‘Jumping to Conclusions’: Bias or deficit? // *Journal of Neuropsychology.* 2012. Vol. 6, No. 1. P. 65–78.
180. *Luu P., Tucker D. M.* Self-regulation by the medial frontal cortex: limbic representation of motive set-points // *Consciousness, emotional self-regulation and the brain / ed. M. Beauregard. Amsterdam: John Benjamin, 2004. P. 123–161.*
181. *MacLean P.* *The triune brain in evolution: Role in paleocerebral functions.* New York: Plenum Press, 1990. 672 p.
182. *Marlowe W.B.* An intervention for children with disorders of executive functions // *Developmental Neuropsychology.* 2000. Vol. 18, No. 3. P. 445–454.
183. *Matousek M., Petersen I.* Frequency analysis of the EEG in normal children and adolescents // *Automation of clinical electroencephalography / eds P. Kellaway, I. Petersen. New York: Raven Press, 1973. P. 75–102.*
184. *Mayer R. E., Moreno R.* Nine Ways to Reduce Cognitive Load in Multimedia Learning // *Educational Psychologist.* 2003. Vol. 38, No. 1. P. 43–52.
185. *McClelland J. L.* Cognitive Neuroscience. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences // International Encyclopedia of Social & Behavioral Sciences / editor-*

- in-Chiefs N.J.Smelser, P.B.Baltes. Amsterdam; New York: Elsevier Science Ltd., 2001. P.2133–2140.
186. *McClelland M. M., Acock A. C., Piccinin A. et al.* Relations between preschool attention span-persistence and age 25 educational outcomes // *Early Childhood Research Quarterly*. 2013. Vol.28, No. 2. P.314–324.
  187. *McClelland M. M., Cameron C. E., Wanless S. B. et al.* Executive function, behavioral self-regulation, and social-emotional competence: links to school readiness // *Contemporary Perspectives on Social Learning in Early Childhood Education* / eds O.N.Saracho, B.Spodek. Charlotte, NC: Information Age, 2007. P.83–107.
  188. *Mischel H. N., Mischel W.* The development of children's knowledge of self-control strategies // *Child Development*. 1983. Vol. 54, No. 3. P.603–619.
  189. *Mischel W.* Delay of gratification in children // *Science*. 1989. Vol.244. P.933–938.
  190. *Mischel W., Ebbesen E. B., Zeiss A. R.* Cognitive and attentional mechanisms in delay of gratification // *Journal of personality and social psychology*. 1972. Vol. 21, No. 2. P.204–218.
  191. *Miyake A., Friedman N. P., Emerson M. J. et al.* Unity and diversity of executive functions and their contribution to complex 'frontal lobe' tasks A latent variable analysis // *Cognitive Psychology*. 2000. Vol. 41. P.49–100.
  192. *Modeling Students' Mathematical Modeling Competencies* / eds R.Lesh, P.L.Galbraith, C.Haines et al. New York: Springer, 2013. P. 385–398.
  193. *Moffitt T. E., Arseneault L., Belsky D. et al.* A gradient of childhood self-control predicts health, wealth, and public safety // *Proceedings of the National Academy of Sciences of The United States of America*. 2011. Vol. 108, No. 7. P.2693–2698.
  194. *Moreno E. M., Kutas M.* Processing Semantic Anomalies in Two Languages: An Electrophysiological Exploration in Both Languages of Spanish–English Bilinguals // *Cogn. Brain Res.* 2005. Vol. 22, No. 2. P.205–220.
  195. *Müller U., Liebermann D., Frye D. et al.* Executive function, school readiness, and school achievement // *Applied cognitive research in K-3 classrooms* / eds S.K.Thurman, C.A.Fiorello. New York, NY: Routledge, 2008. P.41–83.
  196. *Munakata Y., Herd S. A., Chatham C. H. et al.* A unified framework for inhibitory control // *Trends Cogn. Sci.* 2011. Vol. 15. P.453–459.
  197. *Nash H. M., Hulme C., Gooch D. et al.* Preschool language profiles of children at family risk of dyslexia: continuities with specific language impairment // *Journal of Child Psychology and Psychiatry*. 2013. Vol. 54, No. 9. P.958–968.
  198. *Neisser U.* *Cognition and Reality: Principles and Implications of Cognitive Psychology*. New York: W.H.Freeman and Company, 1976. 230 p.
  199. *Newman S. D., Carpenter P. A., Varma S. et al.* Frontal and parietal participation in problem solving in the Tower of London: fMRI and computational modeling of planning and high-level perception // *Neuropsychologia*. 2003. Vol. 41. P.1668–1682.
  200. *Norman D. A., Shallice T.* Attention to action: willed and automatic control of behaviour // *Consciousness and Self-Regulation* / eds R.J.Davidson., G.E.Schwartz, D.E.Shapiro. New York: Plenum Press, 1986. P.1–14.
  201. *Norman D. A., Shallice T.* Attention to action: Willed and automatic control of behavior // *Consciousness and Self-Regulation: Advances in Research and Theory* / eds R.J.Davidson, G.E.Schwartz, D.Shapiro. New York: Plenum Press, 1986. P.1–18.

202. *Nosarti C., Mechelli A., Green D. W. et al.* The Impact of Second Language Learning on Semantic and Nonsemantic First Language Reading // *Cereb. Cortex.* 2010. Vol.20. P.315–327.
203. *Nouri H., Shahid A.* The effect of PowerPoint presentations on student learning and attitudes // *Global Perspectives on Accounting Education.* 2005. Vol.2. P.53-73.
204. *Omura K., Tsukamoto T., Kotani Y. et al.* Neural correlates of phoneme-to-grapheme conversion // *Neuroreport.* 2004. Vol. 15. P. 949–953.
205. *Understanding the brain: Toward a new science.* (Organization for Economic Co-operation and Development (OECD)). Paris: OECD, 2002.
206. *Ozden M., Gultekin M.* The Effects of Brain-Based Learning on Academic Achievement and Retention of Knowledge in Science Course // *Electronic Journal of Science Education (Southwestern University).* 2008. Vol. 12, No. 1. P.1–17. URL: <http://ejse.southwestern.edu>.
207. *Oztopa E., Kawato M., Arbib M. A.* Mirror neurons: functions, mechanisms and models // *Neuroscience Letters.* 2013. No. 540. P.43–55.
208. *Pears K. C., Fisher P. A., Bruce J. et al.* Early elementary school adjustment of maltreated children in foster care: The roles of inhibitory control and caregiver involvement // *Child Development.* 2010. Vol. 81. P.1550–1564.
209. *Pennington B. F., Ozonoff S.* Executive Functions and Developmental Psychopathology // *Journal of Child Psychology and Psychiatry.* 1996. Vol. 37. P.51–87.
210. *Perani D., Abutalebi J.* The Neural Basis of First and Second Language Processing // *Curr. Opin. in Neurobiol.* 2005. Vol. 15, No. 2. P.202–206.
211. *Perrin F., García-Larrea L.* Modulation of the N400 potential during auditory phonological/semantic interaction // *Cognitive Brain Research.* 2003. Vol. 17. P.36–47.
212. *Planton S., Jucla M., Roux F.-E. et al.* The “handwriting brain”: a meta-analysis of neuroimaging studies of motor versus orthographic processes // *Cortex.* 2013. Vol. 49, No. 10. P.2772–2787.
213. *Prencipe A., Zelazo Ph.* Development of Affective Decision Making for Self and Other: Evidence for the Integration of First- and Third-Person Perspectives // *Psychological Science.* 2005. Vol. 16. P.501–505.
214. *Pulvermüller F.* Words in the Brains Language // *Behav. Brain Sci.* 1999. Vol. 22. P.253–336.
215. *Pulvermüller F., Lutzenberger W., Preissl H.* Nouns and Verbs in the Intact Brain: Evidence from Event-Related Potentials and High-Frequency Cortical Responses // *Cereb. Cortex.* 1999. Vol. 9, No. 5. P.497–506.
216. *Purcell J. J., Turkeltaub P. E., Eden G. F. et al.* Examining the central and peripheral processes of written word production through meta-analysis // *Frontiers in Psychology.* 2011. Vol. 2. P.239.
217. *Rapcsak S. Z., Beeson P. M., Henry M. L. et al.* Phonological dyslexia and dysgraphia: cognitive mechanisms and neural substrates // *Cortex.* 2009. No. 45. P.575–591.
218. *Rapp B., Dufor O.* The neurotopography of written word production: an fMRI investigation of the distribution of sensitivity to length and frequency // *J. Cogn. Neuroscience.* 2011. Vol. 23, No. 12. P.4067–4081.

219. Rapp B., Hendel S.K., Medina J. Remodeling of somatosensory hand representations following cerebral lesions in humans // *Cognitive Neuroscience and Neuropsychology*. 2002. Vol. 13, No. 2. P.207–211.
220. Räsänen P., Salminen J., Wilson A.J. et al. Computer-assisted intervention for children with low numeracy skills // *Cognitive Development*. 2009. Vol. 24. P.450–472.
221. Ratey J. *Spark: The revolutionary new science of exercise and the brain*. New York: Little, Brown, 2008. 304 p.
222. Raver C. C., Blair C., Willoughby M. Poverty as predictor of 4-year-olds' executive function: New perspectives on models of differential susceptibility // *Developmental Psychology*. 2013. Vol. 49. P.292–304.
223. Raver C. C., Jones S. M., Li-Grining C. P. et al. Improving preschool classroom processes: Preliminary findings from a randomized trial implemented in Head Start settings // *Early Childhood Research Quarterly*. 2008. Vol. 23. P. 10–26.
224. *Reading, Writing, Mathematics and the Developing Brain: Listening to Many Voices* / ed. by Z. Breznitz, O. Rubinsten, V.J. Molfese et al. Netherlands, 2012. 324 p.
225. Reynolds J. H., Chelazzi L., Desimone R. Competitive Mechanisms Subserve Attention in Macaque Areas V2 and V4 // *J. Neurosci*. 1999. Vol. 19, No. 5. P. 1736–1753.
226. Rodriguez-Fornells A., Rotte M., Heinze H. J. et al. Brain Potential and Functional MRI Evidence for How to Handle Two Languages with One Brain // *Nature*. 2002. Vol. 415. P.1026–1029.
227. Rodriguez-Fornells A., van der Lugt A., Rotte M. et al. Second Language Interferes with Word Production in Fluent Bilinguals: Brain Potential and Functional Imaging Evidence // *J. Cogn. Neurosci*. 2005. Vol. 17, No. 3. P.422–433.
228. Roux K. J., Crisp M. L., Liu Q., et al. Nesprin 4 is an outer nuclear membrane protein that can induce kinesin-mediated cell polarization // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2009. Vol. 106. P.2194–2199.
229. Royall D. R., Lauterbach E. C., Cummings J. L. et al. Executive control function: A review of its promise and challenges for clinical research — A report from the Committee on Research of the American Neuropsychiatric Association // *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*. 2002. Vol. 14, No. 4. P.377–405.
230. Rueda M. R., Rothbart M. K., McCandless B. D. et al. Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention // *Proceedings Nature Academy of Science*. 2005. Vol. 102. P. 14931–14936.
231. Ruhland K., van Geert P. Jumping into syntax: Transitions in the development of closed class words // *British Journal of Developmental Psychology*. 1998. Vol. 16. P.65–95.
232. Sabbagh M. A., Xu F., Carlson S. M. et al. The Development of Executive Functioning and Theory of Mind: A Comparison of Chinese and U.S. Preschoolers. *Psychological Science*. 2006. Vol. 17, No. 1. P.74–81.
233. Sabitzer B. Neurodidactics — a new stimulus in ICT and computer science education // *INTED 2011 Proceedings CD Barcelona 5th International Technology, Education and Development Conference/ eds L. Gómez Chova, I. Candel Torres, A. López Martínez. 2011. Valencia, 7-9 March. Valencia, 2011. P.5881–5889.*
234. Sabitzer B., Pasterk S. Mobile Learning for COOL Informatics — Cooperative Open Learning in a Vocational High School // *6<sup>th</sup> International Conference on Computer Sup-*

- ported Education (CSEDU), April 1–4, 2014, Barcelona, Spain. Barcelona, 2014. P.232–238.
235. *Segal E., Petrides M.* Functional activation during reading in relation to the sulci of the angular gyrus region // *European Journal of Neuroscience*. 2013. Vol. 38. P.2793–2801.
  236. *Shallice T.* Specific Impairments of Planning // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 1982. Vol. 298. P.199–209.
  237. *Shaywitz S.E.* Overcoming dyslexia: A new and complete science-based program for reading problems at any level. New York: Knopf, 2003. 416 p.
  238. *Siegler R.* Cognitive variability // *Developmental Science*. 2007. Vol. 10, No. 1. P. 104–109.
  239. *Siok W.T., Perfetti C.A., Jin Z. et al.* Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture // *Nature*. 2004. Vol. 431. P.71–76.
  240. *Smith E.E., Jonides J.* Storage and executive processes in the frontal lobes // *Science*. 1999. Vol. 283, No. 5408. P.1657–1661.
  241. *Smith S.L., Smith I.T., Branco T. et al.* Dendritic spikes enhance stimulus selectivity in cortical neurons in vivo // *Nature*. 2013. Vol. 503. P.115–120.
  242. *Sousa D.A.* Mind, Brain, and Education: The Impact of Educational Neuroscience on the Science of Teaching // *LEARNING Landscapes*. 2011. Vol. 5, No. 1. P.37–43.
  243. *Spitzer M.* Lernen. Gehirnforschung und die Schule des Lebens Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2006. 506 p.
  244. *St Clair-Thompson H.L., Gathercole S.E.* Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory // *Quarterly journal of experimental psychology*. 2006. Vol. 59, No. 4. P.745–759.
  245. *St Clair-Thompson H.L., Gathercole S.E.* Executive functions and achievements in school: Shifting, updating, inhibition, and working memory // *Quarterly journal of experimental psychology*. 2006. Vol. 59, No. 4. P.745–759.
  246. *Stein M., Federspiel A., Koenig T. et al.* Reduced Frontal Activation with Increasing 2<sup>nd</sup> Language Proficiency // *Neuropsychologia*. 2009. Vol. 47, No. 13. P.2712–2720.
  247. *Stern E., Frischer W.* Wind Im Klassenzimmer. Hartwig Hanser and Steve Ayan [Interview] // *Gehirn & Geist*. 2009. Vol. 6. P.60–65.
  248. *Stern Y.* Cognitive Reserve: Implications for Assessment and Intervention. *Folia Phoniatrica et Logopaedica* // *Neuropsychologia*. 2009. Vol. 47, No. 10. P.2015–2028.
  249. *Stuss D.T., Alexander M.P., Shallice T. et al.* Multiple frontal systems controlling response speed // *Neuropsychologia*. 2005. Vol. 43. P.396–417.
  250. *Suchan J., Karnath H.-O.* Spatial Orienting by Left Hemisphere Language Areas: A Relict from the Past? // *Brain*. 2011. Vol. 134, No. 10. P.3059–3070.
  251. *Tarullo A.R., Obradovic J., Gunnar M.R.* Self-Control and the Developing Brain // *Zero to Three*. 2009. Vol. 29, No. 3. P.31–37.
  252. *Thatcher K.W.* Cyclic cortical reorganization: Origins of human cognitive development // *Human behavior and the developing brain* / eds G.Dawson, K.W.Fischer. New York: Guilford Press, 1994. P.232–266.
  253. *The Cambridge Dictionary of Psychology* / gen. ed. D.Matsumoto / San Francisco State University. Cambridge, New York, Melbourne et al.: Cambridge University Press, 2009. 666 p.
  254. *The Neuropsychiatry of Personality Disorders* / ed. J.Ratey. Cambridge, Mass.: Blackwell Science, 1995. 285 p.

255. *Theurl P.* “Lernen unter Selbstkontrolle” — Entspannung und Kontemplation in Schule und Unterricht // *Neurodidaktik: Grundlagen und Vorschläge für gehirngerechtes Lehren und Lernen* / Hrsg. U. Herrmann. Weinheim, Basel: Beltz, 2009. S. 261–271.
256. *Thompson C., Barresi J., Moore C.* The development of future-oriented prudence and altruism in preschoolers // *Cognitive Development*. 1997. Vol. 12. P. 199–212.
257. *Tominey S.L., McClelland M.M.* Red light, purple light: Findings from a randomized trial using circle time games to improve behavioral self-regulation in preschool // *Early Education & Development*. 2011. Vol. 22, No. 3. P. 489–519.
258. *Tommerdahl J.* A model for bridging the gap between neuroscience and education // *Oxford Review of Education*. 2010. Vol. 36, No. 1. P. 97–109.
259. *Turkeltaub P., Gareau L., Flowers D.L. et al.* Development of neural mechanisms for reading // *Nature Neuroscience*. 2003. Vol. 6, No. 7. P. 767–773.
260. *Unterrainer J.M., Rauss K.S., Kaller C.P. et al.* Perceived conflicts and errors in complex problem solving // *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*. 2008. Vol. 30, No. 7. P. 816.
261. *van der Sluis S., de Jong P.F., van der Leij A.* Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic // *Intelligence*. 2007. Vol. 35, No. 5. P. 427–449.
262. *van der Ven S.H., Kroesbergen E.H., Boom J. et al.* The structure of executive functions in children: a closer examination of inhibition, shifting, and updating // *British Journal of Developmental Psychology*. 2013. Vol. 31, pt. 1. P. 70–87.
263. *Varma S., Schwartz D.L.* How should educational neuroscience conceptualise the relation between cognition and brain function? Mathematical reasoning as a network process // *Educational Research*. 2008. Vol. 50, No. 2. P. 149–161.
264. *Vasishth S., Brüssow S., Lewis R. et al.* Processing polarity: How the ungrammatical intrudes on the grammatical // *Cognitive Science*. 2008. Vol. 32. P. 685–712.
265. *Vigneau M., Beaucoisin V., Herve P.Y. et al.* Meta-Analyzing Left Hemisphere Language Areas: Phonology, Semantics, and Sentence Processing // *NeuroImage*. 2006. Vol. 30, No. 4. P. 1414–1432.
266. *Vigneau N., Ecarnot M., Rabatel G. et al.* Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat // *Field Crops Research*. 2011. Vol. 122, No. 1. P. 25–31.
267. *Vogel S.E., Kaufmann L.* Functional overlap between numerical and spatial magnitude // *The 50th Meeting of the German Psychological Society for Experimental Psychology*. Marburg, 2008. URL: [http://stephanvogel.com/?page\\_id=35](http://stephanvogel.com/?page_id=35).
268. *Wager T.D., Smith E.E.* Neuroimaging studies of working memory: a meta-analysis // *Cogn Affect Behav Neurosci*. 2003. Vol. 3. P. 255–274.
269. *Wandell B.A.* The neurobiological basis of seeing words // *Ann. N. Y. Academy. Sci.* 2011. Vol. 1224. P. 63–80.
270. *Warrington E.K., McCarthy R.A.* Categories of Knowledge. Further Fractionations and an Attempted Integration // *Brain*. 1987. Vol. 110, No. 5. P. 1273–1296.
271. *Weeden J., van, Rosene D.L., Wang R. et al.* The geometric structure of the brain fiber pathways // *Science*. 2012. Vol. 335. P. 1628–1634.
272. *Weiss S., Mueller H.M.* The Contribution of EEG Coherence to the Investigation of Language // *Brain Lang*. 2003. Vol. 85, No. 2. P. 325–343.

273. *Welsh J. A., Nix R. L., Blair C. et al.* The development of cognitive skills and gains in academic school readiness for children from low-income families // *J. Educ. Psychol.* 2010. Vol. 102. P. 43–53.
274. *Wilhelm I., Diekelmann S., Molzow I. et al.* Sleep selectively enhances memory expected to be of future relevance // *The Journal of Neuroscience.* 2011. Vol. 31. P. 1563–1569.
275. *Wolfe P.* Brain matters: translating research into classroom practice. Alexandria, VA: ASCD, 2001. 241 p.
276. *Zaidel E., Hill A., Weems S.* EEG Correlates of Hemispheric Word Recognition // *Brain Research in Language. Literacy Studies.* 2008. Vol. 1. P. 225–245.
277. *Zamarian L., Ischebeck A., Delazer M.* Neuroscience of learning arithmetic — evidence from brain imaging studies // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews.* 2009. No. 33. P. 909–925.
278. *Zelazo P. D., Carlson S. M., Kesek A.* The development of executive function in childhood // *Developmental cognitive neuroscience. Handbook of developmental cognitive neuroscience / eds C. A. Nelson, M. Luciana.* Cambridge, MA: MIT Press, 2008. P. 553–574.
279. *Zull J. E.* The art of changing the brain: Enriching teaching by exploring the biology of learning. Sterling, VA: Stylus, 2002. 266 p.

### Интернет-ресурсы

1. Medical science navigator. URL: <http://www.medicalsciencenavigator.com>.
2. Nano News Net. URL: <http://www.nanonewsnet.ru>.



## Приложение

### 20 переменных, наиболее влияющих на эффективность учебной деятельности и учебные достижения [Hattie, 2009]

Ранг	Объект (область) исследования	Влияние	Комментарий
1	Обучающиеся	Самоотчеты об оценках и учебных успехах	Четкое понимание и высокая осведомленность обучающихся об уровне своих достижений по разным предметам, сформированные, как правило, на основе прошлого учебного опыта. Эти ожидания относительно собственного успеха могут стать препятствием, поскольку некоторые обучающиеся ориентируются на выполнение заданий, соответствующих самооценке своих способностей
2	Обучающиеся	Программы, основанные на теории Ж. Пиаже	Высокая степень соотнесенности стадий развития мышления и учебных достижений. Зная способы мыслительной деятельности и их ограничения на определенной стадии развития, можно подобрать задания соответствующего уровня трудности, а также учесть стадии и последовательность развития мышления и понятийной системы
3	Подходы к преподаванию	Обеспечение формирующей оценки программ	Использование обратной связи, которая обеспечивает учителей информацией о целях инноваций, готовность искать доказательства там, где учащиеся имеют невысокие учебные достижения, чувствительность к достижениям всех обучающихся. Фокусировка внимания на результатах обучения (новых возможностях, появлении новых умений, новых качеств)
4	Учитель	Микро-преподавание	Мини-уроки для небольшой группы обучающихся, чаще всего в лабораторных условиях с последующим обсуждением занятия
5	Школа	Ускорение для одаренных детей	Ускорение прогресса с помощью специальных образовательных программ, большая насыщенность материала, сокращение, повышение уровня сложности учебного плана. Следует учитывать, что ускорение может негативно повлиять на обучающихся, если ускорения не происходит и прогресс в достижениях отсутствует или незначителен

Ранг	Объект (область) исследования	Влияние	Комментарий
6	Школа	Поведение в классе	Управление классом, атмосфера/среда в классе, снижение влияния разрушительного поведения сверстников
7	Подходы к преподаванию	Всестороннее (комплексное) вмешательство для обучающихся с трудностями в обучении	Использование комплексных прямых инструкций и инструктивных стратегических обучающих моделей. Важными компонентами инструкции выступают внимание к последовательности действий, схема «тренировка — повторение — практика», сегментирование информации, деление ее на части для последующего синтеза, четкое дозирование информации, контроль уровня трудности задачи через подсказки и завуалированную помощь (намек), систематическое моделирование шагов решения задачи, обучение в небольших интерактивных группах
8	Учитель	Понятность действий учителя	Хорошая организация, ясные объяснения, использование примеров, руководство практикой и оценкой учебной деятельности
9	Подходы к преподаванию	Взаимное обучение	Акцент на взаимном (обратном) преподавании дает возможность обучающимся учиться на основе диалогической техники и использовать такие когнитивные стратегии, как подведение итогов (суммирование), постановка вопросов, разъяснение, предсказание. Сочетание прямого обучения, использование разнообразных стратегий и обратный обучающий диалог (когда тот, кого учили, занимает роль учителя и уже сам обучает тому, что только что изучал)
10	Подходы к преподаванию	Обратная связь	Наиболее эффективна обратная связь школьников к преподавателю, потому что они знают и понимают, где они делают ошибки, о чем они имеют неправильные или неточные представления или почему они не заинтересованы (не вовлечены) в обучении. Для студентов обратная связь может быть в виде видео-, аудиоматериалов, инструкции на компьютере. Главное, чтобы она была связана с целями обучения. Наименее эффективны запрограммированные инструкции, наказания, похвала, вознаграждения, акцент на личности. Обратная связь эффективнее, когда она содержит информацию о правильных ответах, а не о неправильных. Высокое воздействие обратной связи обеспечивается в ситуации, когда цели сложные и специфичные, но уровень трудности задачи невелик. Это большое педагогическое искусство — обеспечить правильную форму обратной связи на том уровне, на котором учится студент или чуть выше

Продолжение табл.

Ранг	Объект (область) исследования	Влияние	Комментарий
11	Подходы к преподаванию	Отношения учитель — ученик	В классах, где ведущую роль берет на себя учитель, учащиеся проявляют более высокий уровень самоуважения, инициативности, включенности в учебный процесс, саморегуляции, лучшие учебные достижения. Ранг влияния характеристик в отношении «учитель — ученик» (от высокого к низкому): ориентированность, сопереживание, теплота, поощрение сложных видов умственной деятельности (мыслительных процессов высокого порядка), стимулирование к использованию обучающих инструкций, адаптация к различиям, искренность, центрирование на ученике
12	Подходы к преподаванию	Распределение практики	Наибольшие эффекты отмечены при выполнении простых задач с короткими периодами отдыха и сложных задач с длительным отдыхом (не менее 24 часов). Важно не просто тратить больше времени на решение задач, тренироваться в решении, а осознавать, какие специфические учебные навыки должны быть сформированы для достижения успеха
13	Подходы к преподаванию	Метакогнитивные стратегии	Метакогнитивная деятельность включает планирование, понимание подходов к решению учебных задач, оценку результатов и контроль понимания. Наиболее значимые эффекты были получены при использовании метакогнитивных стратегий, связанных с осознанием несогласованности текстов, и самоанализа
14	Обучающиеся	Предварительные достижения	Акцент на имеющихся достижениях позволяет обучающимся сформулировать цели изучения новых тем, а также впоследствии оценить прогресс и самоэффективность
15	Учебный план	Терминология, необходимая для освоения программы	Знакомство с терминологией по конкретной теме значительно улучшает понимание трудных частей программы. Наиболее эффективно продвижение определений и контекстуальной информации, что способствует более глубокой обработке информации, предоставлению как минимум одного или двух признаков, раскрывающих суть понятия
16	Учебный план	Перечитывание	Перечитывание до удовлетворительного уровня беглости позволяет ускорить автоматизацию навыков распознавания слов и декодирования (развиваются во втором и третьем классах). Повторное чтение положительно влияет на понимание прочитанного, свободное владение содержанием прочитанного

Ранг	Объект (область) исследования	Влияние	Комментарий
17	Учебный план	Программы по развитию творчества и креативности	Программы развития креативности, отличающиеся высоким уровнем структурирования, наличием проблемных вопросов и ответов на вопросы обучающихся, имеют высокую эффективность. Успешно реализуются программы, предполагающие развитие мыслительных стратегий и использование эксплицитных инструкций
18	Подходы к преподаванию	Самовербализация и самоанализ	Среди познавательных стратегий навыки самовербализации являются одними из наиболее эффективных для письма и математики. Самоанализ наиболее эффективен у учащихся с низким уровнем развития способностей (школьники с высоким уровнем способностей, как правило, уже активно используют саморегуляторные стратегии). Результат использования техник самоанализа оптимальны в ситуации, когда вопросы задаются до и после, а не во время урока, или через некоторое время, а не «здесь и сейчас»
19	Учитель	Профессиональное развитие	Наиболее эффективными технологиями профессионального развития оказались наблюдение реальных методов преподавания в классе, микропреподавание, обратная связь посредством аудио- и видеоматериалов и практика. Наиболее слабые эффекты профессионального развития получены после дискуссий, лекций, обучающих игр (симуляций), коучинга, моделирования и изготовления печатных материалов или материалов с инструкциями
20	Подходы к преподаванию	Проблемно ориентированное обучение	Проблемно ориентированное обучение наиболее значимо для математики и глубокого погружения в учебный материал, может иметь ограниченные и даже негативные последствия для поверхностных знаний. Залогом успеха является применение знаний, но не их развитие

Учебное издание

*КОСТРОМИНА Светлана Николаевна*

ВВЕДЕНИЕ В НЕЙРОДИДАКТИКУ

*Учебное пособие*

Редактор *О. С. Капполь*

Корректор *Е. В. Величкина*

Компьютерная верстка *Е. М. Воронковой*

Дизайн обложки *А. В. Самойловой*

Подписано в печать 11.03.2019. Формат 70×100<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.

Усл. печ. л. 00,0. Планируемый тираж 000 экз. (1-й завод — 000 экз.). Заказ №

Издательство Санкт-Петербургского университета.

199004, Санкт-Петербург, В.О., 6-я линия, д. 11.

Тел./факс +7(812) 328-44-22

[publishing@spbu.ru](mailto:publishing@spbu.ru)



[publishing.spbu.ru](http://publishing.spbu.ru)

Типография Издательства СПбГУ. 199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, д. 5.

Книги **Издательства СПбГУ** можно

ЗАКАЗАТЬ

на сайте издательства: **[publishing.spbu.ru](http://publishing.spbu.ru)**

в интернет-магазинах: **[ozon.ru](http://ozon.ru)**; **[bookvoed.ru](http://bookvoed.ru)**; **[URSS.ru](http://URSS.ru)**

ПРИБРЕСТИ

в книжных магазинах СПбГУ ***Дом университетской книги***

Менделеевская линия, д. 5

6-я линия В.О., д. 15

Университетская наб., д. 11

А также в магазинах

*Санкт-Петербурга:* Сеть книжных магазинов «Буквоед»

Санкт-Петербургский Дом книги, Невский пр., д. 28

«Подписные издания», Литейный пр., д. 57

*Москвы:*

«Библио-Глобус», ул. Мясницкая, д. 6/3

«Фаланстер», М. Гнездииковский пер., д. 12/27

*Перми:*

«Пиотровский», ул. Ленина, д. 54