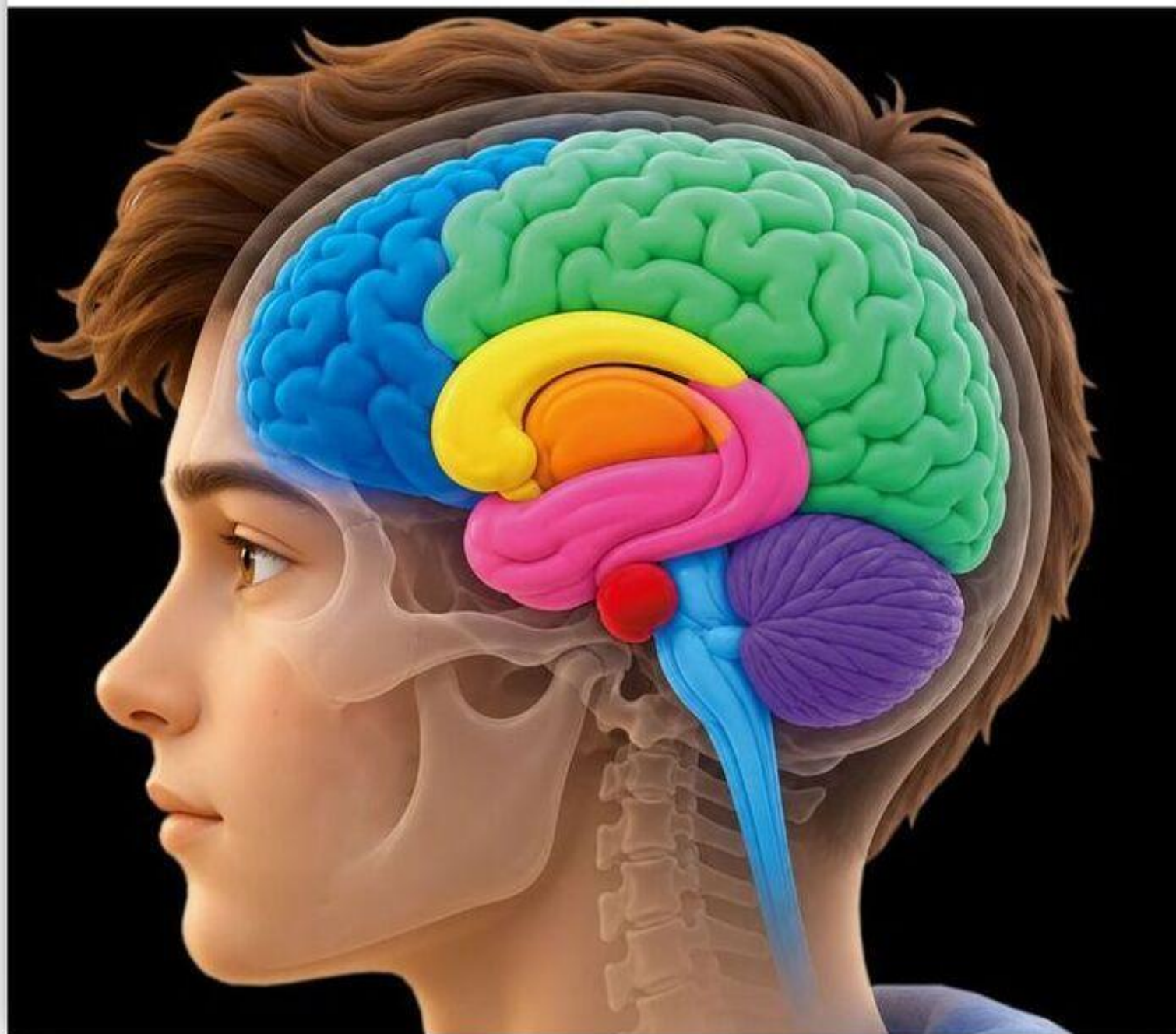


18+

АНТОН СМИРНОВ

Как мозг и тело создают наш внутренний мир



Антон Смирнов

**Как мозг и тело создают
наш внутренний мир**

«Издательские решения»

Смирнов А. Ю.

Как мозг и тело создают наш внутренний мир / А. Ю. Смирнов —
«Издательские решения»,

Как мозг и тело создают нашу личность? Эта книга — путешествие от нейронов и генов до сознания и свободы воли. Она предлагает целостный взгляд на работу мозга: современная наука утверждает, что он не просто реагирует, а непрерывно предсказывает реальность, опираясь на сигналы тела. Вы узнаете, как формируются эмоции, почему мы принимаем решения, где рождается «Я» и как связаны разум и физиология. Без сложного жаргона, но с научной точностью. Для всех, кто хочет понять себя по-настоящему.

© Смирнов А. Ю.

© Издательские решения

Содержание

От автора	6
Предисловие	7
Введение. Мозг как предсказывающий орган в теле	9
Блок I: Эволюционный и онтогенетический контекст	14
Блок II: Молекулярно-генетический и клеточный субстрат	21
Конец ознакомительного фрагмента.	27

Как мозг и тело создают наш внутренний мир

Антон Юрьевич Смирнов

Дизайнер обложки Галина Владимировна Робенау

© Антон Юрьевич Смирнов, 2026

© Галина Владимировна Робенау, дизайн обложки, 2026

ISBN 978-5-0071-0623-8

Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

От автора

В данной работе я выступаю в роли *составителя*, который объединил в связную картину представления предшественников — ученых-нейробиологов и когнитивистов. В следующей книге «Анатомия самоопределения» мы сделаем шаг вперед: рассмотрим высшие психические функции сквозь призму изложенных здесь нейробиологических основ, уточним ряд моделей, выдвинем новые гипотезы и представим обработанные итоги наблюдений и экспериментов.

В данной работе я выступаю в роли *составителя*, который объединил в связную картину представления предшественников — ученых-нейробиологов и когнитивистов. В следующей книге «Анатомия самоопределения» мы сделаем шаг вперед: рассмотрим высшие психические функции сквозь призму изложенных здесь нейробиологических основ, уточним ряд моделей, выдвинем новые гипотезы и представим обработанные итоги наблюдений и экспериментов.

Предисловие

Мы привыкли думать о мозге либо как о биологическом компьютере, либо как о вместилище непостижимой «души». Эта книга предлагает третий путь — гораздо более увлекательный и научно обоснованный.

Вы узнаете, что наш мозг — это *предсказывающий орган*, который неустанно строит модели мира, опираясь на сигналы тела, и постоянно корректирует их, минимизируя «ошибки предсказания».

Для кого эта книга?

Она написана для каждого, кто хочет понять себя, но устал от упрощённых «рецептов для мозга» и не боится отправиться в интеллектуальное путешествие. Вам не потребуется специальное образование: достаточно природного любопытства и готовности удивляться.

Как устроена книга и что в ней особенного?

Мы пройдем путь от молекулярного уровня до феноменов сознания и «Я», строго следуя системной логике — от простых «кирпичиков» ко всё более сложным и интегративным этажам:

— Мы начнём с эволюционных и генетических истоков.

— Разберем клетки, сети, электрические и химические языки, на которых общаются нейроны.

— Увидим мозг в его естественной среде и поймём, почему без тела не бывает ни мышления, ни интуиции.

— Исследуем, как мозг строит предсказания, учится на ошибках и пластично перестраивает сам себя.

— И наконец, разберемся: как рождаются эмоции, что такое рабочая память, почему левое полушарие вечно придумывает объяснения нашему поведению, и что всё это значит для нашего ощущения «Я» и свободы воли.

Легкий способ проверить автора

Каждый раздел завершается списком наиболее важных книг и статей, которые послужили источником информации.

Мы предлагаем не пропускать их, как нечто отдаленное и недостижимое (хотя многие из них только на английском языке, а еще написаны предельно сложно) — есть простой инструмент работы с ними на основе искусственного интеллекта.

Вы можете скопировать специально составленный промпт, подставить название книги и получить сжатое аналитическое резюме (саммари): основные идеи, связь с концепцией «предсказывающего и воплощённого мозга», а также оценку того, насколько эти идеи подтверждены или оспорены современной наукой.

Важное предостережение: ИИ-модели могут ошибаться. Относитесь к результату не как к истине, отлитой в камне: саммари — это лишь приглашение к размышлению, а не замена чтения оригинала.

Скопируйте текст ниже, вставьте точное библиографическое описание книги (автор, название, год) вместо фразы в квадратных скобках и отправьте в любую современную генеративную модель (ChatGPT, Claude, DeepSeek и т.п.).

Промпт для саммари

«Действуй как эксперт в нейробиологии и когнитивных науках, знакомый с книгой [Автор, «Название», год]. Твоя задача — составить аналитическое саммари этой книги, строго придерживаясь следующей структуры:

— Ключевые тезисы книги — 5—7 основных идей, сформулированных через оптику «Как работает наш мозг». Каждый тезис изложи в 1—2 предложения.

— Ключевой пример или эксперимент — опиши один самый яркий пример, клинический случай или эксперимент, на который опирается автор, и объясни, что именно он иллюстрирует в работе мозга.

— Связь с предшественниками и последователями — укажи, на какие более ранние концепции или труды опирается автор, и какие более поздние исследователи развили, подтвердили или оспорили эти идеи.

— Современный статус идей (по состоянию на сегодняшний год) — обязательно с опорой на консенсус в нейронауке:

— Какие тезисы книги в настоящее время убедительно подтверждены и считаются мейнстримом?

— Какие тезисы подверглись существенной критике или были уточнены (и в чём именно)?

— Какие идеи остаются спорными, недоказанными или находятся на стадии гипотез?

Если ты не уверен в точности информации или не знаком с конкретной книгой, прямо заяви об этом».

Желаю успехов!

Введение. Мозг как предсказывающий орган в теле

1. Место раздела в большой картине

Мы открываем книгу, которая попытается ответить на один из самых дерзких вопросов: как физическая материя мозга порождает текучую, субъективную реальность нашего мышления. Обычный взгляд рисует мозг пассивным приёмником: в органы чувств «входят» сигналы, мозг их обрабатывает и выдаёт реакцию. Эта логика «стимул → обработка → ответ» прочно сидит в бытовых представлениях и даже во многих научных моделях XX века.

Современная нейробиология предлагает радикально иной образ. Мозг не ждёт, пока мир впечатается в него. Он **активно предсказывает** будущее, опираясь на весь прошлый опыт, и лишь сверяет свои прогнозы с показаниями органов чувств. Восприятие — это не окно в объективный мир, а наилучшая гипотеза о том, что происходит снаружи и внутри тела. Более того, этот прогностический механизм не висит в пустоте: он неразрывно связан с телом — его биохимией, ритмами сердца, состоянием кишечника и мышечным напряжением. Эволюция лепила мозг не для чистого познания истины, а для выживания, то есть для минимизации опасной неожиданности.

Главный вопрос этого введения: **какую оптику мы наденем, чтобы пройти сквозь всю книгу, не потеряв целостной картины?** И главный, почти провокационный тезис, который будет путеводной нитью: *восприятие, действие и даже мысль — это формы активного вывода, с помощью которого мозг непрерывно конструирует модель себя-в-мире, стремясь удержать неопределённость в приемлемых границах.*

2. Суть, границы и ключевые игроки

Суть темы. Мозг — это воплощённая (эмбодированная) предсказывающая система. Он работает не как фотоаппарат, фиксирующий реальность, а как учёный-экспериментатор, выдвигающий гипотезы о причинах ощущений. Эти гипотезы рождаются из глубин его иерархической архитектуры: высшие зоны коры непрерывно шлют нижележащим зонам «прогнозы» о том, что те должны «увидеть», «услышать» или почувствовать. Встречный поток содержит только одно — **ошибку предсказания**: разницу между ожидаемым и реальным сигналом. Всё, что мы переживаем как стабильную реальность, — это наиболее удачная модель, сконструированная мозгом и не опровергнутая ошибкой.

Чем мозг не является

- Не пассивным зеркалом реальности.
- Не компьютером, который запускает программу на «сенсорном входе» и ждёт результата.
- Не органом, который сперва «воспринимает», а потом отдельно «думает». Восприятие и мышление — звенья одного и того же предсказательного процесса, просто работающего с разным масштабом времени и разными источниками сигналов.

Ключевые учёные и направления

— **Карл Фристон** — нейробиолог, сформулировавший принцип свободной энергии и теорию активного вывода. Его математический аппарат описывает мозг как машину, которая минимизирует неожиданность (сюрприз), постоянно обновляя внутреннюю модель мира.

— **Антонио Дамасио** — автор теории соматических маркеров, показавший, что телесные ощущения (сердцебиение, напряжение мышц) служат фундаментом для рациональных решений и эмоций.

— **Лиза Фельдман Барретт** — психолог и нейрочеловек, разработавшая теорию сконструированных эмоций, где эмоции — это прогнозы мозга о состоянии тела, а не встроены рефлексно.

— **Франсиско Варела и Эва Томпсон** — основатели подхода «воплощённого познания» (embodied cognition), утверждавшего, что ум невозможно понять в отрыве от живого тела и его взаимодействия со средой.

— **Марк Джерард и нейрофеноменология** — исследователи, соединяющие субъективный опыт с динамикой мозговых сетей.

Эти имена и идеи будут возникать на протяжении всей книги не как музейные экспонаты, а как живые инструменты анализа.

3. Анатомия, физиология и функция

Чтобы ухватить суть предсказательного мозга, не нужно пока знать детали анатомии. Нужно прочувствовать принцип. Представьте, что вы спускаетесь по знакомой лестнице, погружённые в мысли. Ваш мозг на основе тысяч прошлых шагов выстроил прогноз: «после десятой ступеньки будет площадка». Нога опускается уверенно — и вдруг ступеньки нет, плоскость появилась раньше. Вы спотыкаетесь. Это не сбой моторики, а **ошибка предсказания**, которая буквально обрушивается на сенсомоторные зоны мозга. Прогноз оказался неверным, и теперь требуется срочная коррекция.

Этот каскад предсказаний и ошибок пронизывает всё — от низших рефлекторных дуг до высших этажей коры. Рассмотрим несколько иллюстраций.

Эффект Холлоу-маски. Если вы видите вогнутую маску лица (обратную сторону), ваш мозг всё равно воспринимает её как выпуклую. Почему? Потому что вся ваша жизнь была наполнена выпуклыми лицами. Вероятностная модель «лица всегда выпуклы» настолько сильна, что зрительная система игнорирует реальные тени и параллакс, заставляя видеть иллюзорную выпуклость. Это классический пример того, как предсказание побеждает сенсорный вход.

Резиновая рука. В известном эксперименте человек прячет свою левую руку под стол, а перед ним лежит резиновая. Экспериментатор одновременно поглаживает кисточкой резиновую и спрятанную руку. Через минуту многие начинают чувствовать, что резиновая рука — их собственная. Если по ней ударить молотком, человек отдёргивает реальную руку. Здесь предсказательная модель тела («моя рука — источник тактильных и зрительных сигналов, совпадающих во времени») обновляется и захватывает искусственный объект. Это показывает, что самоощущение «я» — не данность, а **активный вывод** о границах собственного тела.

Слепое пятно и перцептивное заполнение. В каждом глазу есть зона без фоторецепторов, но мы не видим чёрную дыру. Мозг непрерывно предсказывает, что должно находиться

в этом месте, используя окружающий контекст, и заполняет пропуск. Это не пассивная интерполяция, а генеративная модель зрительной сцены, дорисовывающая реальность.

Повседневность: вкус и цена. Исследования показывают: одно и то же вино кажется людям вкуснее, если им сказали, что оно дорогое. Цена становится прогнозом высокого качества, и мозг настраивает восприятие вкуса так, чтобы минимизировать ошибку между ожиданием и ощущением. Мы буквально пробуем на вкус собственные прогнозы.

Все эти примеры объединяет формула: **восприятие = предсказание, скорректированное ошибкой**. В этой формуле защита и активная роль действия. Ведь чтобы проверить гипотезу «там ступенька», мозг посылает команду ноге. Движение — это не просто моторный ответ, а способ собрать новые сенсорные данные, которые подтвердят или опровергнут модель. Так замыкается петля **активного вывода**: мозг предсказывает → действует → получает сенсорные последствия → обновляет модель.

Именно этот процесс, разыгрывающийся на всех этажах нервной системы, и будет предметом книги. Пока мы оставим его в качестве метафоры, но позже (особенно в Блоке VII) наполним точными вычислительными деталями и формулами.

4. Взаимосвязи и общая оптика мышления

Уже на старте книга закладывает центральную оптику, которая объединит эволюцию, молекулярные каскады, сети, эмоции и сознание. Взгляните на схему взаимосвязей, которая будет детализироваться от раздела к разделу:

Телесная петля → Интероцептивные прогнозы → Эмоции и интуиция → Принятие решений → Действие → Новые сенсорные последствия → Обновление модели

Блок за блоком мы увидим, как генетическая программа и среда строят «мокрую» нейронную сеть (Блок I—III). Как химические языки (Блок IV) переносят сигналы ошибок и прогнозов. Как пластичность (Блок V) калибрует синаптические веса, делая предсказания точнее. Как тело, микробиом и интероцепция (Блок VI) становятся тем фундаментом, на котором мозг строит «сырые» ощущения себя. Как формальный аппарат активного вывода (Блок VII) превращает всё это в стройную теорию. И наконец, как внимание, рабочая память, эмоции и нарративное «Я» (Блок VIII—IX) оказываются разными гранями одного и того же предсказательного процесса.

Почему такая оптика всеобъемлюща? Потому что она даёт единый язык для описания и сбоя. Когда предсказания о теле хронически неточны, возникают тревога, хроническая боль, соматоформные расстройства. Когда предсказания о намерениях других людей ломаются — страдает эмпатия, развиваются черты аутистического спектра или паранойя. Таким образом, мышление предстаёт не мистическим даром, а непрерывным **самообновляющимся моделированием себя-в-мире**, эволюционно заточенным на выживание и пронизывающим каждый уровень — от активности одного гена до социального взаимодействия.

5. Основные постулаты

Сжатые выводы, которые станут точками опоры для всех последующих разделов:

— **Мозг — активный предсказатель, а не реактивный процессор.** Он не ждёт стимула, а непрерывно генерирует гипотезы и проверяет их через сенсорные данные и действия.

— **Восприятие — это сконструированная модель, а не прямая запись реальности.** Мы видим, слышим и чувствуем наилучшие прогнозы мозга, скорректированные сигналами ошибок.

— **Тело — не периферия, а неотъемлемая часть познания.** Интероцептивные сигналы от внутренних органов и мышц служат сырьём для эмоций и интуитивных решений, что делает мышление воплощённым.

— **Предсказательная рамка объединяет все уровни.** От эпигенетической регуляции до социальной ментализации, от синаптической пластичности до сознания — всё подчинено задаче минимизации долгосрочной неожиданности.

— **Мышление — это эволюционно отточенный механизм активного вывода.** Оно позволяет моделировать возможные будущие миры и выбирать действия, которые подтверждают жизнеспособность модели, будь то планирование ужина или выбор жизненной стратегии.

6. Открытые вопросы и дебаты

Теория предсказательного кодирования и принцип свободной энергии — самые влиятельные, но не единственные рамки. Следует признать, что на многие вопросы пока нет окончательных ответов:

— **Как именно нейроны кодируют предсказания и ошибки?** Мы знаем кандидатные механизмы (пирамидные нейроны поверхностных и глубоких слоёв коры), но полной картины нет.

— **Является ли минимизация свободной энергии достаточным объяснением сознания?** Критики утверждают, что эта теория хорошо описывает обработку информации, но не приближает нас к объяснению квалиа — субъективного переживания «каково это — быть мной».

— **Спор «предсказательного мозга» с традиционными моделями.** Некоторые исследователи (например, Дэвид Марр, сторонники прямого восприятия) отстаивают, что зрение и другие модальности могут работать как детекторы признаков без обязательного предсказания. Этот спор далёк от разрешения.

— **Границы воплощённого познания.** Насколько далеко можно расширить «тело»? Включает ли оно инструменты, смартфоны, других людей? Теория расширенного сознания (Энди Кларк, Дэвид Чалмерс) утверждает, что когнитивные процессы могут выходить за пределы черепной коробки, но это остаётся предметом острых дебатов.

— **Индивидуальные различия.** Почему у разных людей разный баланс между опорой на прогнозы и чувствительностью к ошибкам? Возможно, именно здесь лежат ключи к пониманию психопатологии — от галлюцинаций до аутизма.

Эти открытые линии будут аккуратно прослежены в каждом блоке, чтобы показать не только свод установленных истин, но и неуверенность переднего края науки.

7. Сводный глоссарий и список литературы

Ключевые термины введения:

— **Предиктивное кодирование** — иерархический процесс, при котором высшие уровни нейронной системы генерируют прогнозы для низших, а те возвращают ошибки предсказания, обновляющие модель.

— **Активный вывод** — расширение предиктивного кодирования на действия: организм не просто пассивно корректирует прогнозы, а двигается и взаимодействует со средой, чтобы собрать сенсорные данные, подтверждающие его модель.

— **Принцип свободной энергии** — математическая формулировка Карла Фристона, согласно которой любой живой организм, сохраняющий свою целостность, должен минимизировать свободную энергию (информационный аналог неожиданности), поддерживая внутреннюю модель мира.

— **Эмбодимент (воплощённое познание)** — подход, утверждающий, что познавательные процессы невозможно понять в отрыве от тела, его сенсомоторики и физиологического состояния.

— **Интероцепция** — восприятие сигналов, поступающих от внутренних органов и тканей тела (сердцебиение, дыхание, висцеральные ощущения), формирующее базовый фон самоощущения.

— **Соматический маркер** — по Антонио Дамасио, телесный сигнал (учащение пульса, сжатие желудка), который связывается с ожидаемыми исходами решений и направляет выбор до осознанной рациональной оценки.

Литература для углублённого знакомства:

— Friston K. (2010). The free-energy principle: a unified brain theory? *Nature Reviews Neuroscience*, 11 (2), 127—138. — Основополагающая работа по принципу свободной энергии.

— Clark A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36 (3), 181—204. — Блестящий обзор предсказательного мозга в философском и когнитивном контексте.

— Damasio A. R. (1994). *Descartes' Error: Emotion, Reason, and the Human Brain*. — Книга, где впервые развёрнуто представлена теория соматических маркеров.

— Barrett L. F. (2017). *How Emotions Are Made: The Secret Life of the Brain*. — Доступное изложение теории сконструированных эмоций, укоренённой в предиктивной рамке.

— Varela F. J., Thompson E., Rosch E. (1991). *The Embodied Mind: Cognitive Science and Human Experience*. — Классический текст по эмбодименту и нейрофеноменологии.

— Seth A. K. (2013). Interoceptive inference, emotion, and the embodied self. *Trends in Cognitive Sciences*, 17 (11), 565—573. — Связь interoцептивных предсказаний и самости.

— Hohwy J. (2013). *The Predictive Mind*. — Подробный философский разбор предиктивного кодирования.

Этот глоссарий и список — не для заучивания, а как компас для путешествия по книге. В каждой последующей главе мы будем возвращаться к этим понятиям, насыщая их новыми деталями — анатомическими, физиологическими и вычислительными.

Блок I: Эволюционный и онтогенетический контекст

1. Место раздела в большой картине

Мы установили во Введении, что мозг — не пассивный приёмник, а воплощённая предсказывающая система, непрерывно строящая модель себя-в-мире. Но почему он стал именно таким? И как из единственной оплодотворённой яйцеклетки возникает структура, способная на байесовские вычисления и нарративное «Я»? Без ответа на эти вопросы наше понимание останется плоским, лишённым исторической и биологической глубины.

Этот блок задаёт два неразрывных измерения: **филогенетическое** (эволюция вида) и **онтогенетическое** (развитие индивида). Вместе они отвечают на вопрос: *«Почему архитектура мозга такова, какова она есть, и какие принципы закладывают её базовые возможности и ограничения?»* Мы проследим, как простые рефлекторные дуги превратились в прогностические машины, как генетическая программа при участии среды строит неокортекс, и как первичные сети закладывают фундамент всей последующей пластичности. Именно здесь мы впервые увидим, что **нейропластичность** — это неотъемлемое свойство развития, которое превращает генетический черновик в работающую предсказательную модель, настроенную на конкретную среду.

Главный тезис: эволюция создала не жёсткий набор реакций, а **алгоритм построения предсказывающего органа**, который достраивается и калибруется под конкретное тело и окружение в ходе онтогенеза.

2. Суть, границы и ключевые игроки

Суть темы. Мы рассматриваем эволюцию нервной системы от диффузных нервных сетей кишечнорастворимых до иерархического прогностического мозга млекопитающих, а также индивидуальное развитие от нейруляции до формирования крупномасштабных сетей. Сквозная нить: каждый шаг эволюции добавлял новые уровни предсказаний, а онтогенез воспроизводит эту логику в сжатые сроки, подстраивая общий план под уникальную жизненную историю.

Чем это не является. Эволюция нервной системы не является линейным движением «от простого к сложному» с человеком как вершиной. Это ветвящееся дерево, где каждый вид обладает уникальной нервной организацией, оптимальной для своей экологической ниши. Онтогенез — это не просто развёртывание генетической программы, а «танец» между генами и средой, где активность нейронов и внешние стимулы направляют дифференцировку и формирование связей. Здесь нет места наивному генетическому детерминизму, но и идея «чистого листа» столь же неверна.

Ключевые учёные и школы

— **Чарльз Дарвин** заложил основу сравнительного анализа нервных систем. Современная эволюционная нейробиология продолжает его линию, изучая гомологию мозговых структур.

— **Сантьяго Рамон-и-Кахаль** — отец нейронауки, открывший нейронную доктрину и описавший рост конуса аксона, тем самым заложив основы онтогенеза.

— **Дональд Хебб** — его знаменитый постулат «neurons that fire together wire together» («нейроны, активирующиеся одновременно, связываются друг с другом») объяснил, как опыт формирует связи, и стал краеугольным камнем для понимания развития и пластичности.

— **Джеральд Эдельман** — теория нейронального группового отбора (нейродарвинизм), описывающая развитие как отбор из избыточного разнообразия связей на основе активности.

— **Майкл Мерцених и Джон Каас** — пионеры в изучении реорганизации корковых карт после повреждений и обучения, показавшие пластичность взрослого мозга как продолжение онтогенетических механизмов.

— **Карл Фристон** вновь появляется здесь: его идея минимизации свободной энергии естественно вытекает из эволюционного давления — организмы, способные предсказывать, выживают лучше, а онтогенез настраивает эту способность на актуальную статистику среды.

3. Анатомия, физиология и функция

3.1. Эволюция нервной системы: от рефлекторных дуг до прогностического мозга

Первые нервные клетки возникли у древних многоклеточных, таких как губки, для координации движений и реакции на прикосновение. У медуз и гидр мы видим **диффузную нервную сеть** — децентрализованную систему без головного мозга, где сигнал распространяется во все стороны. Это уже не просто раздражимость, но ещё не прогнозирование.

Следующий скачок — **цефализация** (выделение головного узла), появление ганглиев, центральных нервных стволов. У плоских червей возникает билатеральная симметрия и передний мозговой ганглий, который интегрирует сенсорные сигналы и модулирует поведение. Здесь впервые появляется зачаток «модели» — простые ассоциативные связи между стимулами, позволяющие предугадывать последствия.

У позвоночных происходит взрывное усложнение. Возникает **трёхкамерный план** (передний, средний, задний мозг), а затем пятипузырьковый мозг с закладкой коры. Эволюция млекопитающих приносит **неокортекс** — многослойную иерархическую систему, которая позволяет строить всё более абстрактные и долговременные предсказания. Например, старая кора (гиппокамп) формирует когнитивные карты пространства, позволяя мысленно перемещаться в будущее и прошлое. Новая кора добавляет иерархическую обработку: нижние уровни предсказывают простые признаки, а высшие — сложные комбинации и сценарии.

Почему такая траектория? Потому что среда полна статистических закономерностей, и **организмы, которые могли использовать прошлое для предсказания будущего, получали колоссальное эволюционное преимущество**. Рефлекторная дуга червя — это примитивная прогностическая модель: «после стимула А всегда следует Б, готовь реакцию». А мозг человека строит модели социальных ситуаций, погодных циклов и воображаемых миров — это та же логика, возведённая в степень.

3.2. Онтогенез: как генетическая программа и среда строят мозг

Развитие мозга — это поэтапное конструирование, где каждый шаг создаёт контекст для следующего.

Этап 1. Нейруляция и рождение нейронов. Через 3 недели после зачатия эктодерма утолщается, формируя нервную пластинку, которая сворачивается в нервную трубку. Из стволовых клеток внутренней выстилки (нейроэпителия) делением рождаются будущие нейроны и глия — на пике до 250 000 клеток в минуту. Этот процесс задан генетически, но уже на этом этапе чувствителен к среде: например, дефицит фолиевой кислоты у матери увеличивает риск незаращения нервной трубки.

Этап 2. Миграция. Новорождённые нейроны не остаются на месте. Они карабкаются по радиальным глиальным клеткам, как по строительным лесам, в свои конечные позиции в коре. Миграция идёт изнутри наружу: сначала заселяются глубокие слои, затем поверхностные. Нарушения миграции приводят к серьёзным порокам развития (лиссэнцефалия — гладкий мозг без извилин). Это движение нейронов регулируется молекулярными сигналами, но также зависит от электрической активности, предвосхищая будущую роль опыта.

Этап 3. Дифференцировка и запрограммированная гибель. Достигнув места, нейрон выбирает судьбу: станет ли он пирамидной клеткой, звездчатой или тормозным интернейроном (первые — передают сигналы, вторые — принимают, а третьи — гасят избыточную активность). Он отращивает дендритное дерево и аксон, нацеливаясь на определённые зоны. Здесь действует принцип избыточности: нейронов и связей рождается значительно больше, чем нужно. Затем начинается **апоптоз** (запрограммированная клеточная смерть): выживают те нейроны, которые получили достаточную трофическую поддержку (подпитку и стимуляцию) и установили правильные связи. Это конкурентный процесс, напоминающий эволюционный отбор, но внутри одного организма.

Этап 4. Синаптическая перестройка. После закладки грубой карты начинается тонкая настройка. Аксоны и дендриты ветвятся, образуя гораздо больше синапсов, чем останется в зрелом мозге. Затем наступает период интенсивного **прунинга** (обрезки) избыточных синапсов. Какие связи удалить, а какие укрепить — решает активность. Нейроны, которые регулярно совместно возбуждаются, усиливают синапсы и стабилизируют контакты, а неиспользуемые связи отмирают. Это и есть хэббовская пластичность в действии, закладывающая основы коннектома.

Как мы это узнали? Классические эксперименты Хьюбеля и Визеля: если у котёнка закрыть один глаз в критический период (подробнее ниже), нейроны зрительной коры навсегда теряют способность отвечать на этот глаз, а колонки для закрытого глаза сужаются. Мозг перераспределяет ресурсы в пользу активного входа. Это доказывает, что нейрональная активность, вызванная опытом, физически формирует архитектуру коры.

3.3. Первичные сети и критические периоды

Развитие — это не просто рост клеток, а формирование сетей. Уже в утробе, без особого внешнего стимула, спонтанная электрическая активность создаёт первичные магистрали — **прожекционные и ассоциативные тракты**. Сетчатка посылает волны активности в таламус и кору, закладывая топографические карты ещё до открытия глаз. То есть мозг «репетирует» обработку сигналов, используя внутренние модели, что идеально вписывается в предиктивную рамку: система генерирует предсказания сенсорных потоков, и они, совпадая со спонтанной активностью, стабилизируются.

Затем открываются **критические (сенситивные) периоды** — ограниченные временные окна, когда определённые нейронные цепи максимально чувствительны к специфическому опыту. Например, для формирования бинокулярного зрения у человека критический период длится от нескольких месяцев до 7—8 лет. Если косоглазие не исправить в это время, мозг подавит сигнал от одного глаза, и возникнет необратимая амблиопия («ленивый глаз»). Для освоения языка существует свой сенситивный период: дети усваивают фонетику и грамматику без акцента и усилий, а после 12—14 лет способность резко падает.

Критические периоды — ключевое понятие для понимания нейропластичности. Это время, когда предсказательная модель калибруется под статистику среды. Например, зрительная кора учится предсказывать корреляцию между левым и правым глазом для стереопсиса. Если опыт отклоняется от эволюционно ожидаемого, модель формируется с искажениями. Но здесь же и **нейропластичность взрослого мозга**: по окончании критических периодов пластичность не исчезает, а переходит на другой уровень, ограниченный молекулярными «тормозами» (например, перинейрональными сетями). Позже (в Блоке V) мы увидим, как эти тормоза можно частично снять, возвращая мозгу детскую гибкость.

4. Взаимосвязи и общая оптика мышления

Эволюционный и онтогенетический контекст даёт нам фундамент для всей книги.

Входящие и исходящие связи:

— **Гены** → Молекулярно-клеточный субстрат (Блок II): как транскрипционные факторы и эпигенетические метки реализуют программу развития.

— **Среда и опыт** → через активность → Синаптическая пластичность (Блок V): хэббовские правила стабилизируют полезные связи.

— **Первичные сети** → Анатомия и коннектом (Блок III): как ствольные пути становятся каркасом для функциональных сетей.

— **Эволюционное давление** → Предсказательная архитектура (Блок VII): иерархические корково-подкорковые петли созданы, чтобы минимизировать ошибки предсказания.

Теперь мы понимаем, что мозг не просто «предсказывает» в абстрактном смысле, а сама его структурная организация — результат эволюционного отбора на способность предвосхищать события. Критические периоды показывают, как эта способность настраивается на конкретную экологическую нишу и культурную среду. Закладка избыточного числа синапсов с последующей обрезкой — это реализация байесовского принципа «порождения и проверки гипотез» на клеточном уровне: мозг генерирует множество возможных связей (гипотезы о структуре среды), а опыт отбирает те, которые минимизируют ошибку предсказания.

Таким образом, уже на этапе развития **пластичность встроена в саму архитектуру как механизм минимизации будущей неожиданности**. Мозг не рождается чистым листом, а появляется с генетически заданным «априорным знанием» (prior beliefs), закодированным в структуре начальных сетей и правилах пластичности. Онтогенез заполняет эти априорные ожидания конкретными вероятностями из реального мира.

5. Основные постулаты

— **Эволюция создала иерархическую предсказывающую архитектуру.** От диффузных сетей до неокортекса — каждый шаг добавлял новый уровень прогнозирования, позволяя организмам извлекать всё более абстрактные закономерности из среды.

— **Онтогенез — это не развёртывание жёсткой программы, а «совместный танец» генов и опыта.** Генетический план задаёт избыточные связи и молекулярные правила, а активность нейронов, вызванная средой, выбирает и стабилизирует оптимальные конфигурации.

— **Критические периоды — это калибровка предсказательной модели.** В строго отведённое время мозг наиболее чувствителен к определённому типу опыта, что позволяет точно настроить внутренние репрезентации на статистику среды.

— **Нейропластичность — это фундаментальное свойство развития.** Избыточный рост и последующий прунинг на основе хэббовских правил — клеточный механизм, который в зрелом возрасте продолжает работать, но с дополнительными молекулярными ограничениями.

— **Мозг рождается с априорными ожиданиями.** Эволюция встроила в структуру первичных сетей и молекулярные каскады ожидания о базовых свойствах мира (например, существование контуров, лиц, причинно-следственных связей), которые затем уточняются опытом.

6. Открытые вопросы и дебаты

— **Эволюционная психология и её критика.** Насколько точно мы можем реконструировать адаптивное значение конкретных мозговых структур? Критики предостерегают от «адапционистских сказок», когда любой признак объявляется оптимальным эволюционным решением. Многие черты могут быть побочными продуктами или следствием генетического дрейфа.

— **Гомология мозга позвоночных.** Есть ли у коры птиц общий план с неокортексом млекопитающих? Современные данные показывают, что дорсальный желудочек птиц функционально аналогичен, но имеет иную citoархитектуру (клеточное строение) — это открывает споры о том, насколько общие принципы управляли эволюцией.

— **Механизмы закрытия критических периодов.** Открытие молекулярных тормозов пластичности (перинейрональные сети, *Lynx1*, белок *PirB*) позволило частично вернуть пластичность взрослой зрительной коре. Означает ли это, что мы сможем безопасно «переоткрыть» критические периоды у человека для лечения амблиопии или изучения языков? Каковы риски?

— **Баланс избыточности и специализации.** Почему мозг рождает так много нейронов и синапсов, которые потом гибнут? Является ли это энергетически расточительным или необходимым механизмом для поиска оптимальной структуры? Теория нейродарвинизма Эдельмана даёт один ответ, но альтернативные модели (например, предсказательного кодирования) предлагают иное объяснение: избыточность нужна для представления неопределённости (вариабельности) предсказаний.

— **Ранняя травма и пластичность.** Критические периоды подразумевают, что неблагоприятный опыт (депривация, стресс) может навсегда изменить архитектуру мозга. Каковы истинные границы компенсаторной пластичности во взрослом возрасте? Исследования реорганизации коры после ампутации и обучения взрослых показывают, что потенциал изменений велик, но споры о том, насколько именно, продолжаются.

7. Сводный глоссарий и список литературы

Ключевые термины:

— **Филогенез** — эволюционное развитие вида или более крупной таксономической группы.

— **Онтогенез** — индивидуальное развитие организма от оплодотворения до смерти.

— **Нейруляция** — процесс формирования нервной трубки из эктодермы на ранних стадиях зародышевого развития.

— **Радиальная глия** — клетки, служащие направляющими «лесами» для мигрирующих нейронов, а затем превращающиеся в астроциты или нейральные стволовые клетки.

— **Апоптоз** — программируемая клеточная смерть, в ходе которой лишние нейроны уничтожаются без воспаления.

— **Синаптический прунинг** — избирательное удаление избыточных синапсов в процессе развития, обеспечивающее тонкую настройку нейронных сетей.

— **Критический период** — ограниченное окно времени в онтогенезе, когда конкретная функция или область мозга обладает максимальной пластичностью и чувствительностью к определённым видам опыта.

— **Хэббовская пластичность** — принцип, сформулированный Дональдом Хеббом: «если нейрон А постоянно участвует в возбуждении нейрона Б, то синапс между ними усиливается». Часто кратко: «fire together — wire together» (FT—WT).

— **Коннектом** — полная карта нейронных связей организма, структура которой закладывается в онтогенезе и модифицируется опытом.

— **Перинейрональные сети** — специализированный внеклеточный матрикс, окружающий некоторые нейроны и ограничивающий пластичность по окончании критического периода.

Литература для углублённого изучения:

— Purves D., Lichtman J. W. (1985). *Principles of Neural Development*. — Классический учебник, детально описывающий клеточные и молекулярные механизмы развития.

— Hubel D. H., Wiesel T. N. (1970). The period of susceptibility to the physiological effects of unilateral eye closure in kittens. *Journal of Physiology*, 206 (2), 419—436. — Оригинальная работа по критическому периоду зрительной коры.

— Edelman G. M. (1987). *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection*. — Изложение теории нейронального группового отбора.

— Krubitzer L., Kaas J. (2005). The evolution of the neocortex in mammals: how is phenotypic diversity generated? *Current Opinion in Neurobiology*, 15 (4), 444—453. — Обзор эволюционной специализации коры.

— Hensch T. K. (2005). Critical period plasticity in local cortical circuits. *Nature Reviews Neuroscience*, 6 (11), 877—888. — Современный обзор молекулярных механизмов критических периодов.

— Stiles J., Jernigan T. L. (2010). The basics of brain development. *Neuropsychology Review*, 20 (4), 327—348. — Доступное введение в онтогенез человеческого мозга.

— Friston K. J., Tononi G., Reeke G. N., Sporns O., Edelman G. M. (1994). Value-dependent selection in the brain: simulation in a synthetic neural model. *Neuroscience*, 59 (2), 229—243. — Работа, связывающая идеи нейродарвинизма с ценности-зависимым обучением, предвосхищающая активный вывод.

— Greenough W. T., Black J. E., Wallace C. S. (1987). Experience and brain development. *Child Development*, 58 (3), 539—559. — Обсуждается роль опыта в формировании коннектома.

Теперь, заложив эволюционную и онтогенетическую основу, мы можем переходить к молекулярно-генетическому и клеточному субстрату, из которого строится всё это великолепие.

Блок II: Молекулярно-генетический и клеточный субстрат

1. Место раздела в большой картине

Мы проследили, как эволюция и индивидуальное развитие создают архитектуру предсказывающего мозга. Теперь пора спуститься на самый фундаментальный уровень — туда, где гены, молекулы и отдельные клетки образуют физическую ткань мышления. Если мозг — это орган, строящий модель мира, то данный раздел отвечает на вопрос: из какого «сырья» и по каким молекулярным инструкциям собраны вычислительные элементы этой модели, и как они питаются, общаются и поддерживают свою работоспособность.

Главный вопрос: *как генетический код, регулируемый средой, воплощается в клеточном многообразии, которое обеспечивает быстрые электрические вычисления, медленные модуляторные настройки и постоянный метаболический баланс?* И ключевой тезис: нейрон — это динамическая молекулярная машина, чья возбудимость, способность к пластичности и даже выживание непрерывно регулируются как генами, так и сигналами от соседей и тела в целом. Более того, клетки-помощницы — глиа — оказываются полноправными участниками обработки информации, а не просто «клеем».

2. Суть, границы и ключевые игроки

Суть темы. Мы разберём четыре пласта:

- Как генетическая информация и её эпигенетическая регуляция управляют строительством и текущей работой нейронов.
- Морфологическое и функциональное разнообразие нейронов.
- Мир глиа: астроциты, олигодендроциты и микроглия — их неожиданно активная роль в вычислениях и гомеостазе.
- Метаболическое обеспечение мозга и система очистки (лимфатическая система), от которых напрямую зависят когнитивные способности.

Чем не является. Это не сухая инвентаризация молекул. Мы не будем перечислять все известные белки, а выделим принципы: как гены и среда совместно управляют возбудимостью; почему глиа — такой же участник обработки информации, как нейроны; и почему без понимания энергетического бюджета нельзя объяснить ограничения мышления (например, истощение внимания).

Также важно не впасть в генетический детерминизм: гены не задают жёсткую судьбу нейрона, а предоставляют «инструментарий», чувствительный к внешним сигналам.

Ключевые учёные и направления

- **Фрэнсис Крик и Джеймс Уотсон** — открытие структуры ДНК, без которого невозможна молекулярная биология.
- **Эрик Кандел** — Нобелевский лауреат, расшифровавший молекулярные каскады обучения у аплии (морского зайца), показав роль цАМФ, протеинкиназы А и CREB.

— **Бен Баррес** — доказал, что астроциты активно модулируют синаптическую передачу, введя концепцию трёхстороннего синапса.

— **Корнелия Баргманн и Сидней Бреннер** — работы на *C. elegans* прояснили генетическую основу поведения.

— **Марк Тессье-Лавинь и Кори Гудман** — открытия молекул-гидов аксонов (нетрины, семафорины) в развитии.

— Современная эпигенетика (Майкл Мини, Моше Шифф) — как материнская забота через метилирование ДНК меняет реакцию на стресс у потомства.

3. Анатомия, физиология и функция

3.1. Геномика, эпигенетика, транскриптомика: как среда «включает» гены

Все клетки тела содержат одну и ту же ДНК. Почему же нейрон так непохож на клетку печени? Потому что в ней активен (экспрессируется) специфический набор генов, определяющий её форму, электрические свойства и химический язык. Этот набор — **транскриптом** — динамически меняется в ответ на активность нейрона и сигналы среды.

Эпигенетика (буквально «над генетикой») объясняет, как опыт оставляет молекулярные следы на хроматине, не меняя саму последовательность ДНК. Два главных механизма: метилирование ДНК (обычно выключает ген) и модификация гистонов (белков-катушек, на которые намотана ДНК; может как открывать, так и закрывать доступ к генам). Представьте, что ДНК — это книга инструкций. Метилирование — закладка, которая скрывает определённую страницу, а ацетилирование гистонов — открывает страницу для чтения.

Классический эксперимент Майкла Мини. У крыс матери с высоким уровнем заботы (частое вылизывание детёнышей) выращивают потомство со спокойным фенотипом. У потомства небрежных матерей, напротив, повышена тревожность и сильнее реакция на стресс. Оказалось, что вылизывание вызывает выброс серотонина, который запускает каскад, снижающий метилирование гена глюкокортикоидного рецептора в гиппокампе. В результате рецепторов становится больше, обратная связь по кортизолу эффективнее, и стресс гасится быстрее. То есть **поведенческий опыт матери физически изменяет эпигенетические метки и, как следствие, функцию мозга и поведение потомства.** Это поразительный пример того, как социальная среда через эпигенетику настраивает предсказательную модель стресса у детёныша: если мать тревожна, мир опасен — стоит иметь более чуткую систему тревоги.

Немедленные ранние гены (IEGs) — ещё один ключевой механизм. Это гены (например, *c-fos*, *Arg*), которые включаются за минуты в ответ на нейронную активность и запускают синтез белков, необходимых для пластичности. Появление белка *Arg* в дендритных шипиках является маркером того, что этот конкретный синапс только что был активен и готов к изменениям. Таким образом, электрическая активность моментально транслируется в генетическую инструкцию, меняющую структуру связей.

Связь с предсказательным кодированием. Ошибка предсказания, реализованная как электрический сигнал, через вход кальция в клетку может активировать IEGs. Таким образом, событие «мир оказался не таким, как я ожидал» на молекулярном уровне звучит как «запустить программу перестройки синапсов, чтобы обновить модель».

3.2. Клеточная архитектура: нейроны

Нейрон — поляризованная клетка, чья форма отражает функцию приёма, обработки и передачи информации. Его главные части:

— **Сома (тело):** содержит ядро и основные органеллы, интегрирует входящие сигналы.

— **Дендриты:** ветвистые «антенны», усеянные тысячами синапсов. Их сложная геометрия не случайна: дендритное дерево выполняет локальные нелинейные вычисления ещё до того, как сигнал достигнет тела. Дендритные шипики — микроскопические выросты, на которых образуются возбуждающие синапсы; их форма и количество динамически меняются при обучении.

— **Аксон:** длинный «кабель», проводящий потенциал действия к другим нейронам, мышцам или железам. Аксонный холмик — место, где генерируется выходной импульс.

— **Синаптические терминали:** концевые веточки аксона, содержащие везикулы с нейромедиатором.

Классификация нейронов — это не скучная таксономия, а ключ к пониманию схемотехники мозга:

— **По морфологии:** пирамидные (главные возбуждающие клетки коры), звездчатые, веретеновидные, корзинчатые.

— **По функции:** возбуждающие (обычно глутаматергические) и тормозные (обычно ГАМКергические). Тормозные интернейроны невероятно разнообразны (корзинчатые, канделябровидные, Мартинотти и др.), и каждый тип прицельно тормозит определённые части пирамидной клетки — сому, аксонный холмик или дистальные дендриты — осуществляя точный контроль над вычислениями.

— **По нейромедиатору:** дофаминергические (вознаграждение, мотивация), серотонинергические (настроение, импульсивность), холинергические (внимание, пластичность) и т. д. Эти небольшие ядра в стволе и базальном переднем мозге посылают свои аксоны по всему мозгу, модулируя общий режим обработки.

Почему это важно для мышления? Представьте корковую колонку. Пирамидные нейроны генерируют прогнозы, посылая сигналы вниз по иерархии, а тормозные интернейроны вычисляют и передают ошибки предсказаний, регулируя баланс возбуждения и торможения. Без точной настройки этого баланса (E/I balance) предсказательная модель либо галлюцинирует (избыток возбуждения), либо упускает важные сигналы (избыток торможения).

3.3. Глия: не просто «клей», а активные участники вычислений

Глиальных клеток в мозге примерно столько же, сколько нейронов, и их роль далеко выходит за рамки поддержки.

Астроциты — звёздчатые клетки, окутывающие синапсы. Один астроцит контактирует с тысячами синапсов. Их ключевые функции:

— **Трёхсторонний синапс (tripartite synapse):** астроцит чувствует нейромедиатор (глутамат), выделившийся в синаптическую щель, и в ответ сам выбрасывает собственные сигнальные молекулы (глиотрансмиттеры, например, АТФ, D-серин), модулируя силу передачи. То есть обработка информации — это не диалог двух нейронов, а разговор трёх участников.

— **Регуляция внеклеточного калия и глутамата:** астроциты убирают излишки, предотвращая перевозбуждение.

— **Участие в лимфатической системе** (см. ниже).

— **Энергоснабжение:** они захватывают глюкозу из крови и передают нейронам лактат как топливо.

Олигодендроциты — клетки, оборачивающие аксоны миелиновой оболочкой. Миелин — это электроизоляция, которая резко ускоряет проведение потенциала действия. Но это не статичная обмотка. Миелинизация продолжается и во взрослом возрасте, ускоряя часто используемые пути. Обучение игре на пианино или жонглированию увеличивает объём белого вещества в соответствующих трактах. Таким образом, олигодендроциты — это «инженеры», оптимизирующие пропускную способность сети под текущие задачи.

Микроглия — иммунные клетки мозга. Они постоянно сканируют среду своими подвижными отростками. Их роль в здоровом мозге:

— **Синаптический прунинг:** во время развития и при обучении микроглия поедает слабые синапсы, помеченные молекулами комплемента («съешь меня»). Это тот самый механизм, который реализует обрезку избыточных связей.

— **Регуляция нейрогенеза:** во взрослом гиппокампе микроглия участвует в судьбе новорождённых нейронов.

— **Нейровоспаление:** при травме или стрессе микроглия активируется и выделяет цитокины, которые могут нарушать пластичность и даже убивать нейроны, если активация хроническая. Связь микроглии и депрессии, хронической боли, нейродегенерации — горячая тема современной науки.

3.4. Нейроэнергетика и лимфатическая система

Мозг потребляет около 20% энергии тела, имея лишь 2% массы. Энергия тратится в основном на работу Na^+/K^+ -АТФазы — насоса, восстанавливающего ионный баланс после потенциалов действия. Поэтому **мышление — энергозатратный процесс**, а утомление — не иллюзия, а отражение истощения локальных метаболических ресурсов.

Лимфатическая система — это система очистки, открытая в 2012 году Майкеном Недергаард. Спинномозговая жидкость через пространства вокруг артерий затекает в ткань мозга, смешивается с межклеточной жидкостью и вымывает «мусор» — в частности, бета-амилоид, накопление которого связывают с болезнью Альцгеймера. Ключевой момент: эта система активна в основном во время глубокого сна. Астроциты при этом сокращаются, увеличивая пространство для тока жидкости. Таким образом, **сон — не просто отдых, а жизненно необходимая процедура очистки, без которой предсказательная машина перегревается и засоряется**.

Вопрос-ответ: почему после интенсивной умственной работы мы чувствуем усталость, даже если тело не двигалось? Исследования показывают, что в префронтальной коре накапливается глутамат, который не успевает утилизироваться. Это повышает «стоимость» продолжения активности, и мозг через чувство утомления сигнализирует о необходимости переключиться, чтобы дать время на метаболическую уборку — прямой пример энергетического ограничения предсказательных вычислений.

4. Взаимосвязи и общая оптика мышления

Молекулярно-клеточный уровень не существует изолированно — он пронизывает всю книгу:

— **От генов к предсказаниям:** эпигенетические метки, нанесённые опытом, меняют пороги возбудимости нейронов, что эквивалентно изменению «априорных ожиданий» на клеточном уровне. Например, эпигенетически сниженная экспрессия рецепторов кортизола в гиппокампе делает ось стресса более реактивной — мозг начинает предсказывать угрозу чаще и интенсивнее, что ложится в основу тревожных расстройств.

— **Глия как часть вычислительной архитектуры:** астроциты, модулируя синаптическую передачу, не просто подстраивают силу сигнала, а участвуют в вычислении точности предсказаний (precision weighting), что критично для байесовского мозга. Олигодендроциты, ускоряя проведение по часто используемым путям, реализуют структурное закрепление удачных прогнозов.

— **Энергетика и ограничения:** принцип свободной энергии требует минимизации неопределённости, но любое вычисление стоит калорий. Истощение ресурсов или накопление отходов заставляет мозг искать более простые, энергоэффективные модели, что объясняет когнитивные искажения, стереотипное мышление при усталости или переход к быстрым эвристикам.

— **Связь с Блоком IV и V:** ионные каналы и потенциал действия, изученные здесь на клеточном уровне, станут основой для электрических языков мозга. Молекулярные каскады (CaMKII, CREB), запускаемые активностью, — это мост к долговременной потенциации и памяти.

Таким образом, молекулярный субстрат — это не просто «кирпичики». Это та среда, где эпигенетические и метаболические состояния постоянно задают наклон «вычислительной плоскости» для всех вышележащих сетей. Предсказательный мозг буквально сделан из материи, которая меняет свои свойства в ответ на точность собственных прогнозов.

5. Основные постулаты

— **Гены задают не судьбу, а инструментарий.** Опыт через эпигенетические механизмы регулирует, какие именно гены будут активны, тем самым меняя структуру и функцию нейронных сетей.

— **Нейрон — поляризованная вычислительная единица.** Его морфология (дендритное дерево, аксон) и химический фенотип (нейромедиатор) определяют его роль в предсказательной иерархии.

— **Глия — соавтор когнитивных процессов.** Астроциты участвуют в синаптической передаче и вычислениях (трёхсторонний синапс), олигодендроциты оптимизируют проведение сигналов, а микроглия постоянно перестраивает связи и следит за здоровьем ткани.

— **Мышление энергоёмко.** Активность нейронов требует постоянного и массивного притока энергии, а её истощение и накопление метаболитов напрямую ограничивают продолжительность и качество когнитивной работы.

— **Сон — не пауза, а обязательное техобслуживание.** Глимфатическая система во сне очищает мозг от продуктов распада, поддерживая способность предсказательной машины к точной работе на следующий день.

6. Открытые вопросы и дебаты

— **Эпигенетическое наследование поведения.** Могут ли эпигенетические метки, приобретённые родителем, передаваться потомству у млекопитающих? Данные о трансгенерационном наследовании реакций на стресс спорны, но активно изучаются.

— **Глиотрансмиссия и сознание.** Насколько вычисления, производимые астроцитарными сетями, специфичны и могут ли они участвовать в высших когнитивных функциях, включая сознание? Некоторые авторы предполагают, что без учёта глии нельзя объяснить интегративные процессы, но это далеко не общепринято.

— **Нейрогенез взрослого человека.** Споры о масштабах и функциональной роли рождения новых нейронов в гиппокампе взрослого человека продолжаются. Является ли это значительным вкладом в память или лишь рудиментом?

— **Нейровоспаление как причина психических расстройств.** Теория о том, что депрессия и шизофрения могут быть следствием хронической активации микроглии, набирает популярность, но клинические испытания противовоспалительных препаратов дают неоднозначные результаты.

— **Полная расшифровка коннектома на уровне синапсов.** Сможем ли мы когда-нибудь прочитать память по молекулярным следам? Проект «Коннектом человека» на макроуровне достигим, но молекулярный коннектом — это динамическая, а не статическая цель.

7. Сводный глоссарий и список литературы

Ключевые термины:

— **Эпигенетика** — изменения экспрессии генов, не связанные с изменением последовательности ДНК (метилование ДНК, модификации гистонов).

— **Транскриптом** — совокупность всех РНК-молекул, синтезированных в клетке в данный момент, отражающая активные гены.

— **Немедленные ранние гены (IEG)** — гены, активирующиеся быстро и транзиторно в ответ на клеточные стимулы, запускающие долговременные программы пластичности (c-fos, Arc).

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.