

Автостопом по мозгу. Когда вся вселенная у тебя в голове

Автор:

[Елена Белова](#)

Автостопом по мозгу. Когда вся вселенная у тебя в голове

Елена Михайловна Белова

Сенсация в медицине

1,3 килограмма – таков средний вес человеческого мозга. Однако эта «малютка» в нашей голове потребляет 20 % всей энергии, которую мы получаем в течение дня. С чего бы такое расточительство, когда функционирование других органов нашего тела не менее важно для полноценной жизни?

Разобраться в этом, а также в других вопросах решила биохимик, биоинформатик и нейрофизиолог Елена Белова. Вместе с ней вы посмотрите на мозг с самых разных сторон и узнаете, пожалуй, все, что известно о нем ученым на данный момент. Можно ли выжить без головы? Почему среди людей с феноменальной памятью много аутистов? Какая из частей мозга отвечает за распознавание эмоций и что будет, если ее отключить? Почему мы отвлекаемся и ленимся (и можно ли обойтись без этого)?

Итак, вы готовы отправиться в путешествие по извилистым дорожкам нашего «бортового компьютера»?

В формате PDF A4 сохранён издательский дизайн.

Елена Белова

Автостопом по мозгу. Когда вся вселенная у тебя в голове

Моим учителям

© Белова Е.М., текст, иллюстрации, 2021

© ООО «Издательство «Эксмо», 2022

Пролог: почему самоубийства удивляют сильнее квантовой физики

Голова – предмет темный и исследованию не подлежит.

Цитата из к/ф «Формула любви»

В 2017 году в селе Целинное в Курганской области произошла трагедия: 40-летний сварщик был убит взрывом. На территории предприятия по строительству и ремонту автодорог, где он работал, сварщик обнаружил списанную гаубицу и решил проверить, может ли она стрелять. Он не придумал ничего умнее, чем наполнить огнетушитель карбидом[1 - Карбид чрезвычайно бурно реагирует с водой, выделяя горючий ацетилен и тепло, поэтому эту смесь используют для сварки, а не наполняют ею огнетушители! – Прим. авт.] с водой и зарядить им гаубицу. Взрыв самодельного снаряда почти оторвал ему голову.

Надо сказать, дикие обстоятельства этой истории заинтересовали не только Следственный комитет и новостные сайты. Неудачливый сварщик-артиллерист из российской глубинки стал одним из победителей премии Дарвина в 2017 году[2 - Премия Дарвина – это ежегодная виртуальная антипремия, которую присуждают людям, погибшим самыми идиотскими способами. Таким образом, победители исключают свои гены из генофонда человечества, увеличивая шансы на выживание нашего вида в будущем (это официальный,

хоть и не бесспорный критерий присуждения награды, описанный на сайте премии). – Прим. авт.]. Компанию нашему соотечественнику составили другие, не менее достойные кандидаты: малазийский маг, сваривший себя заживо в гигантской сковородке с рисом и кукурузой во время ритуала очищения тела и души; две мексиканские девушки, решившие сделать селфи прямо на взлетно-посадочной полосе действующего аэропорта и убитые крылом приземляющегося самолета; грабитель, который решил пробраться в аптеку через крышу, по пути застрял и был задушен собственной одеждой, и еще десяток оригиналов, умудрившихся убиться разными необычными способами.

Люди замороженно читают истории победителей премии, недоумевая, как до такого вообще можно додуматься! Что происходит в головах у людей, когда они запихивают огнетушитель с взрывоопасной смесью в гаубицу или запирают себя в гигантской сковородке, стоящей на огне? Однако, если вдуматься, удивляет нас не изобретательность героев этих историй, точнее, не только она. Изобретательностью мало кого удивишь: люди смогли додуматься до теорий эволюции и относительности, радиоэлектроники и рентгенографии, блокчейна и виртуальной реальности, разобраться в строении атома и устройстве космоса. Человечество умеет придумывать куда более невероятные штуки, чем селфи в смертельно опасных местах. Но мы все равно замороженно читаем о фатальных глупостях, которые совершают люди по всему миру, и поражаемся им намного больше, чем изящным научным теориям и прорывным технологиям. Почему?

Средний вес человеческого мозга – 1,3 кг.

Все дело в том, что мозг нужен в первую очередь для выживания. Слух, зрение и обоняние помогают мозгу понять, что происходит вокруг, и быстро сориентироваться, где может быть опасность, а где можно от нее укрыться. Мозг посылает команды мышцам и управляет руками и ногами (или лапами, крыльями и хвостом), чтобы добежать до укрытия и не угодить в лапы к хищнику. Память помогает мозгу хранить информацию о том, чем лучше питаться и куда отправиться, чтобы добыть себе пищу, как добраться до водопоя и где поджидают опасности. Животные обзавелись мозгом потому, что он повышает шансы избежать неприятностей и благополучно дожить до того момента, когда можно будет оставить свои гены потомкам, чтобы они потом

передали эту эстафету дальше.

Конечно, дело не ограничивается только мозгом: поговорка «Сила есть – ума не надо» намекает на то, что в природе есть множество способов занять свое место под солнцем. Кто-то пытается добиться своего силой, другие ставят на скорость («Сначала догони, потом убей»), броню или ядовитость – у каждого животного своя суперсила. Люди лишены мощных когтей, зубов и бронированных покровов, способных защитить от опасности; мы не умеем летать и не слишком быстро бегаем, мы великоваты, чтобы хорошо прятаться, и слабоваты, чтобы не приходилось этого делать.

Наше супероружие – разум. Люди анализируют ситуации и используют накопленный опыт, чтобы извлекать знания о том, как устроены вещи, а знания – чтобы решать проблемы и достигать своих целей. Человек не приспосабливается к окружающей среде – он приспособливает ее под свои нужды. Мы заселяем пригодные и непригодные для обитания человека пространства и почти сразу создаем максимально комфортные для себя условия – с канализацией, отоплением, вайфаем и доской для мотивирующих стикеров.

К человеческому разуму прилагается еще одно незаменимое дополнение – речь. Люди не просто размышляют и накапливают знания, они обмениваются ими друг с другом. Информация – очень классная штука: делась с другими, ты ничего не теряешь и можешь продолжать пользоваться ею дальше сколько угодно. Обмениваться знаниями очень выгодно: не обязательно самому совать руку в розетку, чтобы узнать, к чему приводит удар электрическим током. Мы можем пользоваться лайфхаками, придуманными кем-то еще, и избегать неприятностей, в которые вляпались другие, потому что нам рассказали об этом. Люди с интересом читают истории чужих несчастий, чтобы самим не угодить в беду.

Премия Дарвина – это подборка максимально нелепых историй, показывающих, что бывает, когда люди не задумываются о последствиях своих действий. И дело тут не в генах, а в банальном невежестве.

Обычно люди стараются прикинуть, к чему могут привести их действия, а если им не хватает информации, они стараются ее найти – самостоятельно или спрашивают тех, кому доверяют.

Знания бывают узкоспециализированными и универсальными: инструкции и рецепты объясняют, как действовать в конкретной ситуации, а универсальные знания – как вообще устроен мир. Такие знания помогают справляться с разными задачами, но требуют более широкого кругозора. Например, любители географии ориентируются без компаса на незнакомой местности, а зная биологию, человек не будет лечить вирус антибиотиками, предназначенными для бактериальных инфекций. Такие универсальные знания производит наука: с помощью наблюдений и экспериментов она проверяет, насколько работает то или иное объяснение и годится ли оно для предсказания явлений и процессов в будущем.

Наука отбирает полезные знания, которые помогают объяснять мир, и использует их в интересах человечества.

Лишь недавно наука разработала подходы, позволяющие исследовать человеческий мозг, не вскрывая череп, а еще технологии, способные добраться до любого нейрона в мозге животных и повлиять на его работу. Теперь нейробиологи ежегодно поражают людей новыми удивительными открытиями. Чтение мыслей, мозговые чипы, управляющие роботами, возвращение зрения и слуха – все это уже перебирается из области фантастики в сферу передовых нейротехнологий. И параллельно мы узнаем все больше о работе мозга. Наука помогает понять, как работает человеческий мозг, как мы воспринимаем мир и принимаем решения, какие процессы происходят за границами осознаваемого и как образ жизни и привычки влияют на наш мозг.

В этой книге я постаралась рассказать, как устроен мозг человека: чем заняты различные отделы внутри мозга, как мозг поддерживает процессы жизнедеятельности, каким образом в нем уживаются эмоции и холодный расчет, почему наше зрение иногда нас обманывает, как мы учимся новому и чем отличаемся от роботов и компьютеров. Надеюсь, что она поможет читателям лучше понять себя, разобраться с тем, как работает наша психика, увидеть особый смысл в таких простых, на первый взгляд, вещах, как сон и безделье, проникнуться сложностью и изяществом работы самого главного органа в человеческом теле, который делает нас людьми, – головного мозга.

Как устроен наш мозг

Глава 1

Что находится в основании мозга

Жизнь без головы: когда реальность оказывается невероятнее фантастики

10 сентября 1945 года фермер Ллойд Олсен отрубил голову цыпленку, как делал сотни раз до этого. Обстоятельства произошедшего обезглавливания противоречивы: одни источники утверждают, что цыпленок был предназначен для семейного ужина, другие говорят, что он был одним из десятков цыплят для продажи на мясном рынке [1, 2]. Как бы то ни было, мы точно знаем одно: на этот раз топор фермера прошел немного выше, чем обычно, и после обезглавливания цыпленок убежал с места расправы (вообще-то такое часто бывает с курами). Однако дальше случилось небывалое: Олсен оставил цыпленка на ночь в закрытой коробке, и когда на следующее утро вышел проверить, что с ним, обнаружил, что цыпленок все еще жив. Он спокойно переночевал, спрятав под крылом шею и то, что осталось от головы, и вроде бы совершенно не собирался помирать в ближайшее время.

Олсен дал необычному цыпленку имя Майк. Майк мог ходить и довольно ловко балансировать на жердочке, кроме того, он порывался кукарекать и чистить перья, но это уже выходило не так удачно. Заинтригованный фермер решил посмотреть, как долго сможет прожить цыпленок без головы. Он стал поить его через пипетку смесью воды с молоком и кормить, помещая зерна и червяков пинцетом прямо в пищевод Майка. Кроме того, Олсен регулярно удалял слизь.

Через неделю, когда стало ясно, что умирать в ближайшее время Майк так и не собирается, Олсен повез его в Университет Юты в Солт-Лейк-Сити. Ученые обследовали цыпленка и обнаружили, что основные системы жизнеобеспечения и рефлекторные центры в стволе головного мозга не были задеты, что и позволило Майку выжить.

Новость о случившемся быстро распространилась по местным газетам, а Олсен начал гастролировать с Майком, участвуя в представлениях бродячих цирков с необычным петухом. Олсен и Майк стали настоящими знаменитостями: их история и фотографии появились на страницах многих американских журналов. Умер Майк только через полтора года из-за случайности. По одной из версий, в трахею Майка каким-то образом попало зернышко, перекрыв доступ кислорода, и цыпленок задохнулся; по другой – трахею забила слизь, которую Олсен регулярно удалял, чтобы покормить цыпленка.

Он прожил без головы полтора года

* * *

Как же Майку удалось выжить? Лезвие топора не задело яремную вену, и цыпленок лишился лишь части головы: то, что было ближе к шее, включая ствол головного мозга, осталось невредимым. Кроме того, цыпленку еще раз крупно повезло: кровяной сгусток на отрубленной шее образовался достаточно быстро, предотвратив массивную кровопотерю, которая могла бы закончиться смертью птицы.

Курицы – довольно безмозглые птицы, у них в принципе нет извилин и вообще не так уж много серого вещества выше уровня глаз – основная масса нервной ткани находится как раз в основании черепа.

Скорее всего, фермер удалил не более пятой части мозга Майка, оставив неповрежденными примерно 80 % мозга по массе (и, как выяснилось, почти 100 % по функционалу) [2].

Как известно, куры совершенно не отличаются сообразительностью и полагаются в основном на рефлексы и простые автоматические действия – этого достаточно, чтобы спать, ходить, находить в земле и клевать еду (тут Майку мешало скорее отсутствие клюва, а не мозгов), пытаться чистить перья (опять-таки, не хватало клюва) и убегать в случае опасности.

Чтобы жить жизнью курицы, вовсе не обязательно иметь кору головного мозга – с большинством задач они справляются безо всякого обучения и мышления, полагаясь на врожденные программы поведения, «зашитые» на подкорке.

Самые важные для выживания и поддержания жизнедеятельности структуры расположены ближе к шее – они называются «ствол головного мозга».

Как устроен ствол головного мозга

Хотя внешние очертания головного мозга по мере его развития меняются до неузнаваемости, в общем плане его строения есть практически неизменные характерные особенности, вне зависимости от того, чей именно мозг мы рассматриваем (конечно, если дело касается позвоночных животных). По иронии судьбы у безголового Майка как раз уцелевшие отделы мозга были сравнительно похожи по строению на такие же отделы в человеческом [3]. С другой стороны, те части, которых лишилась эта очень везучая курица, у человека, наоборот, чрезвычайно разрослись и занимают внушительную часть общего объема – благодаря им мы гораздо умнее не только кур, но и более мозговитых шимпанзе, бонобо [3 - Карликовый шимпанзе. – Прим. ред.] и горилл.

Цыпленок Майк прожил полтора года без головы и умер лишь из-за досадной случайности.

Ствол мозга расположен в самом основании черепа: если смотреть снизу вверх, он идет от спинного мозга, спрятанного внутри позвоночника, и упирается в парную структуру – правый и левый таламусы (вместе с большими полушариями они относятся уже не к стволу, а к переднему мозгу). В стволе мозга происходит интеграция информационных потоков от головы к телу и от тела к голове, контроль основных жизненных функций, оценка общего состояния организма и поддержание нужного уровня бодрости. От ствола мозга отходят десять из двенадцати пар черепных нервов, которые в основном участвуют в обмене информации с головой и шеей, однако один из этих нервов – блуждающий – в том числе управляет работой гладких мышц в грудной клетке и брюшной полости.

Строение ствола головного мозга довольно схоже у птиц и людей

Если черепные нервы в основном соединяют мозг с головой и шеей, то большая часть сообщения с телом ниже шеи происходит через спинной мозг. Его можно представить как магистральное шоссе, соединяющее мозг с остальным организмом: через него проходят пучки афферентных нервных отростков (они сообщают отделам головного мозга о том, что происходит с телом) и пучки эфферентных нервных волокон (передают информацию от мозга обратно к телу). Основную часть этих эфферентных путей составляют отростки мотонейронов, которые управляют мышечными сокращениями, – например, дирижируют мельчайшими сокращениями мышц пальцев, когда нам необходимо перелистнуть страницу книги или напечатать сообщение другу, или координируют мышцы ног, корпуса и рук, когда спортсмен пытается установить рекорд по прыжкам в высоту. Однако в спинном мозге есть и проводящие пути вегетативной нервной системы. Она управляет состоянием внутренних органов и кровеносных сосудов и настраивает режим работы организма: начиная от максимальной боевой готовности, необходимой спортсмену во время соревнований, вплоть до полной расслабленности и покоя, которые особенно хороши, когда нужно восстановить запас сил, переварить съеденную пищу или подремать.

Продолговатый мозг – ворота в головной мозг человека

Где именно заканчивается спинной мозг и начнется головной (продолговатый), определить не так-то просто. Никакой четкой границы нет: все выглядит так, словно спинной мозг постепенно утолщается и разрастается, плавно переходя в следующий отдел. Обычно границу проводят на уровне затылочного отверстия – там, где тяж нервной ткани выходит за пределы черепа. Немного выше на поверхности ствола уже появляются многочисленные отдельные парные «веточки» черепных (или черепно-мозговых) нервов, о них мы поговорим чуть ниже. Продолжая сравнение с деревом, можно сказать, что «крона» головного мозга находится еще выше, скрывая от взгляда исследователя самую верхнюю часть ствола. По большому счету, ствол мозга – это полноправная (и, как мы убедились, чрезвычайно важная) часть головного мозга. Даже небольшие повреждения на этом уровне грозят по-настоящему тяжелыми и трагическими последствиями, чего не скажешь о большинстве других отделов [4].

Мозговой ствол – это входные ворота практически для всей информации, поступающей в мозг. Через них же информация отправляется и в обратном направлении: от мозга ко всем органам и тканям.

Поверхность тела особенно богата всевозможными рецепторами, которые определяют температуру (терморецепторы), силу натяжения или давления на поверхность кожи (механорецепторы) и всевозможные повреждения в тканях (болевые рецепторы). Механорецепторы есть не только на коже; специальные их типы расположены в стенках кровеносных сосудов, сердца и полых органов типа желудка (благодаря этому мы чувствуем тяжесть, когда съели слишком много). Механорецепторы в мышцах и связках помогают мозгу оценить, насколько напряжена каждая мышца и как они расположены относительно друг друга. Такие мышечные механорецепторы называются проприоцепторы – они очень важны для правильной координации движений. Если канал связи между мозгом и проприоцепторами прерван, люди не могут нормально двигаться: они буквально теряют управление над мышцами и те ведут себя довольно не предсказуемым для человека образом.

Фактически единственный орган, до которого мозг не дотягивает свои чувствительные нервные окончания, – это... он сам. Мы прекрасно ощущаем, если вдруг в нашем теле что-то «сломалось»: порезана кожа, сломана кость, воспален какой-то внутренний орган – на поверхности и в глубине организма расположены миллионы болевых рецепторов, которые следят за тем, чтобы все находилось в целостности и сохранности. Однако в мозге болевых рецепторов нет: именно это позволяет нейрохирургам проводить операции на открытом головном мозге, пока пациент находится в сознании, и не повредить ненароком важную его часть, удаляя опухоль, сосудистую аномалию или участок измененной ткани мозга, которая является причиной эпилептических приступов.

Как и на любой большой магистрали, потоки входящей и выходящей информации вдоль продолговатого мозга и далее в глубь ствола разведены. Сенсорная информация от тела к мозгу идет по тяжам нервных волокон, которые находятся ближе к спине и затылку, а двигательная – от мозга к телу, – наоборот, идет вдоль передней (брюшной) части ствола, расположенной ближе к лицу. Сигналы к мышцам переносят столько нервных волокон, что они образуют очень заметные вздутия на передней поверхности продолговатого мозга – их называют пирамидами. В пирамидах двигательные волокна от первичной моторной коры правого и левого полушария перекрещиваются: кора справа управляет мышцами слева, и наоборот. Различные типы волокон, соединяющие тело с мозгом, перекрещиваются в разных точках вдоль оси нашего тела: такое положение вещей помогает неврологам правильно определить место поражения в нервной системе с помощью оценки того, как нарушается подвижность и чувствительность в разных частях тела пациента.

Помимо того, что продолговатый мозг служит точкой транзита для внушительных потоков информации, которой тело и мозг постоянно обмениваются, у него есть и собственные очень важные задачи.

В продолговатом мозге расположены центры, отвечающие за множество автоматических процессов и рефлекторных реакций. Они обеспечивают правильную работу многих процессов, необходимых для постоянства внутренней среды. Множество небольших скоплений нервных клеток в основании мозга непрерывно следят за тем, как сокращается наше сердце, как идут процессы газообмена – сколько в крови кислорода и углекислого газа, какое сейчас кровяное давление. Если что-то идет не так, центры в продолговатом мозге немедленно запускают рефлекторные реакции, призванные поправить положение дел. В крови не хватает кислорода и много углекислого газа?

Будем дышать чаще и глубже. Хемочувствительные клетки регулируют не только дыхание и сердцебиение, но и могут запускать рвотный рефлекс, если в крови появляется что-то подозрительное (это очень разумно, учитывая, что самый простой способ отравиться – это съесть что-нибудь ядовитое или протухшее). Кроме нейронов, запускающих рвотный рефлекс, здесь находятся группы нейронов, управляющих другими защитными реакциями: кашлем, чиханием и глотанием.

Правому и левому полушариям мозга дельфинов приходится спать по очереди, иначе дельфин задохнется.

Все эти процессы запускаются без каких-либо сознательных усилий – во-первых, внимание лучше занять более интересными вещами, а во-вторых, все это слишком важно, чтобы сделать произвольным: если человек отвлечется и не успеет вовремя закашляться, когда в трахею что-то попало, он рискует умереть от удушья. Или, например, представьте, что нам приходилось бы сознательно контролировать каждый вдох и выдох от рождения до самой старости – мягко говоря, безрадостная перспектива (особенно с учетом того, что примерно треть жизни мы вообще проводим в «отключке» – во сне – и ничего не можем сознательно контролировать).

Мост и мозжечок

Выше продолговатого мозга начинается следующий отдел – это задний мозг, где расположены мост и мозжечок. Мост – это что-то вроде большого транспортного узла, через который проходит множество нейронных отростков: снизу вверх, сверху вниз, слева направо и справа налево. В основании моста вдоль ствола лежит кортикоспинальный тракт – нервные волокна, которые идут от моторной коры, управляющей сознательными движениями, к спинному мозгу – сверху вниз. Кроме того, в поперечном направлении через мост идет часть проводящих путей, соединяющих правую и левую части мозга.

Особенность работы нашего мозга в том, что левое полушарие отвечает за движение и чувствительность правой половины тела и наоборот. Мост (наряду

со спинным и продолговатым мозгом) служит одной из тех точек, где нервные волокна от нейронов, управляющих движениями мышц или несущих информацию от них, пересекают срединную линию, соединяя противоположные половины тела и головного мозга. На уровне моста двигательная информация, которую подкорковые двигательные отделы отправляют вниз к телу, меняет сторону движения на противоположную. В глубине головного мозга есть множество отделов, помогающих моторной коре управлять телом. Они формируют экстрапирамидную систему (в отличие от пирамидной, которая отвечает за сознательные движения), а также берут на себя управление автоматическими действиями и следят за мышечным тонусом, а моторная кора контролирует действия, совершаемые произвольно.

Мозжечок получает собственные копии информации, отправляющейся от мозга к телу и от тела к мозгу. Он сравнивает «желаемое» (то, какое движение нам хотелось бы совершить) с «действительностью» (тем, какое движение мы на самом деле совершаем), вносит коррективы в двигательные команды и отправляет свои «пожелания и предложения» в первичную моторную кору и спинной мозг, управляющие мышцами.

В отличие от больших полушарий, полушария мозжечка контролируют движения именно со своей стороны тела: когда мы делаем что-то правой рукой, нашими движениями управляют правая половина мозжечка, но левая половина двигательной коры больших полушарий. Двигательный контроль в мозге осуществляется в буквальном смысле наперекосья, по несколько раз пересекая срединную линию между правой и левой половинами мозга.

Мозжечок находится как раз сверху над мостом, отделенный от него четвертым желудочком – это самая нижняя из полостей мозга со спинномозговой жидкостью. У мозжечка, словно у жучка, есть три пары ножек – верхние, средние и нижние (а у большого мозга, как и у человека, ножек всего одна пара). Ножки состоят из белого вещества – проводящих волокон, связывающих мозжечок с другими отделами нервной системы, которые управляют движениями, формируя потоки входящей и выходящей информации. Нижние и средние ножки работают на вход, то есть несут информацию от спины и мозгового ствола и от коры головного мозга, соединяя мозжечок с мостом; верхние ножки работают на выход: отправляют обработанные в мозжечке сигналы обратно к другим отделам в среднем мозге, таламусе и больших полушариях.

Как известно, мозжечок играет ключевую роль в координации движений (об этом мы поговорим в разделе про движения). Тем не менее задачи мозжечка не ограничиваются только ролью дирижера, который каждое мгновение следит за тем, насколько сокращена или расслаблена каждая из нескольких сотен мышц в нашем теле. Мозжечок важен для переключения внимания между слуховыми и зрительными стимулами, а еще он во многом отвечает за наше восприятие времени.

Отделы заднего мозга координируют позу и осанку, помогают нам быстро вернуть потерянное равновесие. Кроме движений тела, нейроны заднего мозга управляют мимикой и речью, а также многими рефлекторными движениями глаз. Например, когда мы смотрим на пейзаж, проносящийся за окном поезда, наши зрачки чрезвычайно быстро перемещаются из стороны в сторону, позволяя фиксировать отдельные детали в зрительном поле. Такие быстрые неосознаваемые рефлекторные движения глаз называются саккадами. Они помогают нам фокусировать взгляд и не терять ориентацию, координируя между собой движения корпуса, шеи и глаз, когда мы активно двигаемся и одновременно следим за другими перемещающимися объектами.

В мосту, как и в продолговатом мозге, есть свой центр, контролирующий дыхание. Он координирует вдохи и выдохи с другими автоматическими движениями типа жевания и глотания, блокируя вдох, когда пища отправляется из ротовой полости в пищевод. Еще в заднем мозге находится центр, управляющий парадоксальным сном (с быстрыми движениями глаз), – об этом мы поговорим подробнее в разделе о сне.

Средний мозг

Средний мозг – самая высокоуровневая из структур мозгового ствола. Верхняя часть среднего мозга называется крышей; но состоит она не из черепицы, а из холмиков (или бугров). Всего бугров четыре: нижняя пара занимается слуховыми сигналами, верхняя – зрительными. Четверохолмие на крыше мозга играет важную роль в ориентировочных рефlekсах: благодаря этим структурам мы можем быстро определить источник новых и заметных сигналов – обернуться на шум или перевести взгляд туда, где замигала лампочка. Особенность этих ориентировочных рефlekсов в том, что они происходят без участия сознания. Люди, потерявшие зрение из-за повреждений зрительной коры, тем не менее фиксируют взгляд на неожиданной яркой вспышке света, хоть и не осознают

того, что что-то увидели. Все потому, что зрительная информация достигает верхних холмиков независимо от зрительной коры.

Еще выше четверохолмия находится эпифиз – так называемый третий глаз. Он маркирует верхнюю границу между таламусом и стволом, снизу граница проходит вдоль зрительного тракта. Эпифиз чувствителен к световому режиму – тому, когда и сколько света мы видим в течение дня.

В темноте эпифиз вырабатывает мелатонин, который работает как мягкое снотворное, синхронизируя суточные ритмы активности с режимом освещения.

В среднем мозге полость четвертого желудочка сужается и формирует узкий канал со спинномозговой жидкостью под крышей мозга – водопровод. Крыша мозга – это его «потолок», а «пол» этого канала выстилает покрывка мозга. Она состоит из ядер для третьего и четвертого черепных нервов, которые как раз управляют движениями глаз, и представляет собой часть ретикулярной формации (см. ниже).

Отделы среднего мозга участвуют в управлении движениями глаз: они особенно важны для вертикальных движений зрачков, а также контролируют их размер, позволяя глазу адаптироваться к темноте или яркому свету. Здесь также есть центры, связанные с позой и локомоцией. Можно сказать, что все отделы ствола мозга контролируют положение нашего тела в пространстве, но каждый из них играет свою особую роль. Например, повреждения продолговатого мозга могут нарушить чувство равновесия – человек в этом случае постоянно раскоординирован и теряет баланс, мучаясь от головокружений. Повреждения на уровне среднего мозга тоже нарушают контроль положения тела, но в этом случае человек скорее будет принимать ненормальные, но стабильные позы, не теряя равновесия.

В глубине среднего мозга есть небольшой канал для спинномозговой жидкости – это водопровод (или Сильвиев водопровод). Спинномозговая жидкость омывает мозг, поддерживает нужный водно-солевой баланс и снабжает нервные клетки всем необходимым (например, в ней содержатся нейроэндокринные факторы, необходимые для нормальной работы нервных клеток), а еще она работает

канализацией, отводящей от нервных клеток продукты жизнедеятельности и токсины. Закупорка этого канала червато гидроцефалией, то есть избыточным накоплением жидкости в мозге, увеличенным внутричерепным давлением и другими неприятностями. Кроме того, вокруг этого канала сосредоточена важная группа нервных клеток – центральное серое вещество (ЦСВ).

В центральном сером веществе есть нейроны, производящие естественные анальгетики мозга – энкефалины, способные регулировать восприимчивость к боли. Например, очень важно снизить болевую чувствительность, когда предстоит схватка с врагом или бегство от хищника: в таких напряженных условиях все силы и внимание необходимо сосредоточить на противнике – отвлекаться на ссадины и царапины, когда убегаешь от собаки или отбиваешься от хулигана, не только глупо, но и опасно. Когда угроза уйдет, можно будет оценить размер ущерба, а пока погоня или драка не окончены, надо сделать все возможное, чтобы выстоять и оказаться в безопасности.

Внутри мозга нет рецепторов, поэтому операции на мозге нередко проводят в сознании – человек ничего не чувствует.

Еще центральное серое вещество активно участвует в управлении разными формами защитного поведения. От того, какие клетки активны внутри ЦСВ, критически зависит наша реакция на угрозу. Как известно, есть те, кто в момент опасности скорее мобилизуется и бежит/дерется, а есть те, кто при встрече с угрозой застывает на месте и не способен пошевелиться. Так вот, когда у нас неприятности, активную жизненную позицию обеспечивают нейроны ЦСВ, расположенные сверху и по бокам от канала со спинномозговой жидкостью, а вот за паралич воли отвечают нейроны снизу (чуть ближе к месту соединения со спинным мозгом). В такой реакции на опасность тоже есть свой смысл: иногда «прикинуться ветошью» и переждать гораздо разумнее, чем кидаться наутек, гарантированно привлекая к себе внимание врага. К сожалению, когда речь доходит до выбора стратегии поведения, древние структуры в продолговатом мозге руководствуются своей внутренней логикой и совершенно не прислушиваются к тем доводам, которые появляются на следующих уровнях иерархии. Как бы мы ни убивались по поводу того, что не смогли пошевелиться от страха, когда надо было отважно кинуться в схватку (ведь правда на нашей

стороне), скорее всего, в следующий раз по-настоящему серьезная буря эмоций опять отключит доводы разума, предоставляя управление горстке нейронов в самой глубине мозга [5].

Ретикулярная формация

Вдоль всего ствола мозга проходит ретикулярная формация – это нервная ткань, в которой нейроны и их отростки расположены хаотично, а не упорядоченными группами и отходящими от них пучками, как в остальном мозге [6, 7]. Это придает нервной ткани сетчатую структуру: «ретикулярный» и переводится с латыни как «сетчатый». Ретикулярная формация объединяет части продолговатого мозга, моста и среднего мозга в единую систему, идущую от спинного мозга к таламусу. Она способна менять режим работы всего организма, регулируя уровень бодрости и концентрации внимания, которые человек способен проявить.

Ретикулярная формация проходит через сердцевину ствола мозга и получает информацию от всех сенсорных и двигательных систем и отделов мозга, расположенных неподалеку. Это одна из древних систем выживания, которая координирует рефлексy и простые формы поведения, она задает ритм сердечных сокращений, управляет чередованием вдохов и выдохов, контролирует темп выполнения простых стереотипных движений.

В ретикулярной формации находятся группы клеток, вырабатывающие важные нейромедиаторы – ацетилхолин и моноамины серотонин, дофамин и норадреналин. Они связаны с мотивацией, настроением, энергичностью, возбуждением. Здесь же расположены группы нервных клеток, контролирующие пульс, артериальное давление и пищеварение, восприятие боли, частоту и глубину дыхания (когда мы не следим за вдохами и выдохами), положение и перемещение тела в пространстве, напряженность мышц, режим сна и бодрствования. Кроме того, координируются процессы, способные по первому тревожному сигналу быстро перевести человека в режим боевой готовности: только что человек клевал носом, развалившись на диване, не мог сосредоточиться на книге, но вдруг страшный грохот в соседней комнате словно

переключает невидимый тумблер. Человек тут же вскакивает, напряженно оглядываясь: сон как рукой сняло, сердце бешено стучит, все внимание поглощено тем, что же случилось за дверью. Такую неспецифическую реакцию на неожиданные и заметные внешние стимулы обеспечивает как раз активирующая система внутри ретикулярной формации.

Черепные нервы

Все черепные нервы, за исключением первых двух пар – обонятельного и зрительного, – входят в мозг на уровне мозгового ствола [5]. Черепные нервы – обязательный пункт программы для студентов, изучающих нейробиологию: во-первых, через них мозг получает информацию от органов чувств: обонятельный, преддверно-улитковый и зрительный нервы несут информацию о запахах, звуках и том, что происходит в поле нашего зрения, а отдельные части лицевого, языкоглоточного и подъязычного нервов отвечают за вкусовое восприятие. Кроме того, через черепные нервы мозг управляет мышцами головы и шеи. Благодаря этому мы можем не только жевать, показывать язык и улыбаться, но и переводить взгляд с объекта на объект, а еще крутить головой и пожимать плечами. Единственная белая ворона в дружной семье черепных нервов, контролирующей голову и шею, – это блуждающий нерв. Он тоже берет на себя некоторые «головные» функции – иннервирует глотку и гортань, собирая сенсорную информацию и передавая обратно двигательную. Однако самые длинные его отростки уходят далеко вниз, к органам грудной клетки и брюшной полости: он успокаивает пульс, расслабляет кровеносные сосуды и активизирует пищеварение, когда организм переключается из режима «бей и беги» в режим «отдыхай и переваривай».

У человека 12 пар черепных нервов, и 10 из них отходят от ствола головного мозга

Черепные нервы оканчиваются в ядрах – специализированных группах клеток, которые получают или отправляют информацию по своим нервам. Ядра, расположенные в стволе мозга, чрезвычайно важны для нормальной работы всех черепных нервов, за исключением обонятельного.

Бабочка, запертая в скафандре

«Скафандр и бабочка» – это название книги, которая вышла во Франции 7 марта 1997 года. Ее автор, Жан-Доминик Боби, диктовал текст рукописи в течение многих месяцев, будучи запертым в собственном теле [4].

Боби работал главным редактором журнала Elle до декабря 1995 года, когда в результате обширного инсульта в области ствола головного мозга он впал в кому. Через 20 дней он пришел в сознание, однако обнаружил, что не может пошевелиться – повреждения в области моста привели к полному двигательному параличу. Инсульт разъединил верхнюю часть ствола и переднюю часть мозга с тем, что располагалось ниже: нижней частью ствола, спинным мозгом и остальным телом. Помимо того что Боби не мог пошевелить телом, он не был способен жевать и глотать и за 20 недель потерял 27 кг. Единственное, чем Боби мог управлять произвольно, были движения левым глазом.

Несмотря на тяжесть своего состояния, Боби полностью сохранил высшие нервные функции: он продолжал чувствовать и мыслить, мучительно переживая то, что теперь бабочка его разума заперта в скафандре тела, управлять которым он больше не мог.

Инсульт в области моста частично повредил способность Боби ощущать свое тело и лицо, но не до конца: он чувствовал онемение, покалывание и жгучую боль в отдельных частях тела.

Жан-Доминик Боби хотел поделиться с миром своей историей. Используя для связи с миром единственную возможность произвольного движения – моргание глазом, – Боби смог надиктовать текст своей книги с помощью ассистентки. Она диктовала буквы французского алфавита, а Боби моргал, когда слышал нужную ему букву.

«До тех пор мне никогда не доводилось слышать о мозговом стволе. В тот день я совершенно неожиданно обнаружил для себя эту основную деталь нашего бортового компьютера, непрерывную связующую нить между мозгом и нервными окончаниями, когда сердечно-сосудистое нарушение вывело вышеупомянутый ствол из строя. Прежде это называли кровоизлиянием в мозг, и от этого

попросту умирали. Развитие реанимационных технологий усовершенствовало кару. Выжить можно, но при этом заполучишь то, что англосаксонская медицина и окрестила как раз locked-in syndrome: парализованный с головы до ног пациент замурован в собственном теле, он мыслит, но этого не видно, и единственным средством общения становится левый глаз, которым человек может моргать» [8].

Спустя два дня после выхода своей книги Жан-Доминик Боби умер от пневмонии. Его книга стала бестселлером: она была издана в 30 странах миллионными тиражами.

Полтора года жизни, уготованные безголовому цыпленку Майку, сохранившему невредимым ствол и лишившемуся передних отделов мозга, и полтора года жизни, которые суждено было прожить писателю Жану-Доминику Боби после повреждений в стволе, разительно отличались – как отличаются и задачи тех отделов, что поддерживали в них эту жизнь.

Глава 2

Что находится выше мозгового ствола? Краткий путеводитель по строению мозга

Рассказ о мозге невозможен без знакомства с терминологией. Если мы хотим научиться ездить на автомобиле, неплохо бы отличать капот от багажника, пассажирское кресло – от кресла водителя, выучить, где находятся педали тормоза, газа и переключения передач, а также названия и смысл деталей, рычагов и кнопок, которые придется использовать водителю. Иначе инструктор просто не сможет объяснить нам, как всем этим пользоваться.

С мозгом примерно так же: наша психика устроена очень сложно, а мозг «оборудован» множеством важных штук, отвечающих за те или иные процессы.

Задачи, кажущиеся простыми, решаются благодаря сложным процессам внутри мозга, большинство из которых мы даже не осознаем.

Казалось бы, чего проще – узнать знакомого в толпе людей; найти нужный подъезд в незнакомом районе по сбивчивым описаниям родственников; сразу понять, что сегодня не стоит заводить разговор с начальником о повышении зарплаты или пройти по бордюру в обход лужи, перескочив по пути особо грязную и скользкую секцию, и не потерять равновесия. Однако все это процессы невероятной сложности – разработчикам компьютеров не удастся добиться таких высот от роботов, хотя те могут мгновенно вычислить корень четвертой степени из ста сорока семи или извлечь из памяти файл, загруженный на жесткий диск семь с половиной лет назад (и даже выдать список всех файлов, созданных или измененных в тот день).

В общем, наш мозг – удивительный и сложный орган, который умеет справляться с невероятным разнообразием хитроумных задач (хоть они и кажутся нам заурядными и простыми). Чтобы в самых общих чертах описать, как устроен и работает наш мозг, нужно для начала знать названия основных частей и отделов, о которых пойдет речь дальше[4 - Надо сказать, что знание анатомии мозга – ценный навык и полезный маркер/признак, который помогает хотя бы примерно оценить компетентность человека, рассуждающего о мозге. Когда я зарегистрировалась на «Клубхаусе» и стала ходить по разным тематическим комнатам, где обсуждали психологию и связанные с ней темы, обратила внимание на то, что большинство «экспертов», назидательно рассказывающих что-то про нейробиологию, в 99 случаях из ста говорят просто «мозг». «Наш мозг хочет», «мозг решает», «мозг знает», «мозг управляет», «в мозге то», «в мозге это». На мой взгляд, человек, который хотя бы немного понимает в нейробиологии, будет более конкретен в описаниях: «префронтальная кора не может пересилить лимбическую систему, и вы идете на поводу у эмоций», «миндалина сигнализирует об опасности, и вы не можете перебороть страх собеседований», «кора переутомлена, и базальные ганглии включают режим автопилота, вот вы и забываете зайти в магазин после работы». Такие объяснения – тоже упрощения, далекие от точного описания нейробиологических процессов, но все же знание анатомии мозга увеличивает шансы, что человек перед вами более компетентен и примерно понимает, как работает мозг. Это как если человек говорит вам о поломке машины, но не может уточнить, где находится неисправность и какие детали, скорее всего, придется заменить, вы вряд ли поверите, что он автомеханик: вероятно, он

обычный профан, и вряд ли стоит всерьез воспринимать его советы. – Прим. авт.].

Общее устройство мозга отражает процессы его формирования. Наша нервная система состоит из головного и спинного мозга и множества нервных волокон, которые соединяют их со всеми органами и тканями. У зародыша нервная система изначально закладывается как бороздка из складок кожи на спине. Этот желобок углубляется, а затем окончательно погружается в толщу тела и становится нервной трубкой, дающей начало спинному мозгу, расположенному в глубине позвоночника. В полости этой трубки находится спинномозговая жидкость, которая очень важна для нормальной работы нервной системы.

Наш головной мозг развивается из системы пузырей на конце нервной трубки – она сложным образом сворачивается и изгибается внутри зародыша, поскольку места в голове не так уж и много. Но если мысленно выпрямить развивающийся головной мозг, можно разобраться, к каким отделам относятся разные его структуры. У человека конечный мозг разрастается особенно сильно – это то, что мы называем большим мозгом или большими полушариями мозга. По мере развития большого мозга почти все остальные его отделы прячутся под «шапкой», к тому же еще изгибаются вслед за направлением роста, образуя систему дуг и арок (это можно заметить на следующей картинке). Полости со спинномозговой жидкостью внутри пузырей образуют желудочки головного мозга.

Спереди на конце нервной трубки формируется пузырь (точнее, сразу несколько, расположенных один за другим): это «заготовка» для будущего головного мозга. Постепенно его форма усложняется, а по бокам формируются все более сложные отростки. Передний отдел разрастается особенно сильно, вырастая сначала вверх и немного загибаясь назад, – именно так закладывается и начинает расти головной мозг. Однако отделы, расположенные под покровом конечного мозга, не так уж сильно отличаются у людей по сравнению с другими млекопитающими. Чем ближе к спинному мозгу, тем больше сходство в строении и работе отделов мозга. Общий принцип строения головного мозга позвоночных животных можно описать так. В центре у основания головного мозга расположены самые древние отделы, которые появились в эволюции раньше

всего и отвечают за простые автоматические процессы и формы поведения. Ближе к конечным отделам по мере продвижения к поверхности мозга появляются все более сложные отделы, тут выше изменчивость в строении и назначении – это те отделы, которые появляются в эволюции намного позже и во многом обеспечивают специфические для каждого вида задачи [1].

Через мозговой ствол курсирует значительная часть информации, передаваемой от мозга к органам.

Неровная и бугристая, изрезанная бороздами и извилинами часть, которую иногда принимают за собственно мозг, – это все-таки лишь одна из частей нашего головного мозга. Неудивительно, что ее называют большим мозгом (как бы противопоставляя маленькому мозгу – мозжечку). Снаружи большой мозг покрыт корой – серым веществом толщиной несколько миллиметров, в котором «сидят» тела нервных клеток, в то время как их длинные отростки образуют белое вещество [5 - Белый цвет белому веществу придает миелин – это что-то вроде изоляции на электрических проводах, только эта изоляция обязательно имеет прорехи (перехваты Ранвье) и образована специальными клетками, оборачивающимися вокруг нервных отростков. Окруженные миелином нервные волокна быстрее распространяют сигнал, который мгновенно перескакивает с одного открытого участка (перехвата Ранвье) на другой, вместо того чтобы медленной волной распространяться вдоль отростка, как это происходит с немиелинизированными нервными волокнами. Такой же принцип использовали китайцы для передачи сигналов вдоль Великой Китайской стены. Вместо того чтобы отправлять гонца с сообщением на многие километры пути вдоль стены, строители оборудовали ее сигнальными башнями; когда кто-то из охранников замечал какую-то угрозу, в ближайшей башне немедленно зажигали огонь, его замечали в соседних башнях, и там тоже появлялись огни. За несколько десятков минут сигнал тревоги распространялся на сотни километров вдоль всей стены. Перехваты Ранвье работают чем-то вроде сигнальных башен, только сигнал они распространяют не огнями, а перепадами электрического напряжения на мембране (потенциалами действия).] под поверхностью коры. Кора большого мозга разделена на два полушария – правое и левое. Они соединены крупными пучками проводящих путей, через которые оба полушария обмениваются информацией – это мозолистое тело.

Хотя большинство людей не задумываются о том, что еще есть в головном мозге, кроме двух больших полушарий, «под покровом» большого мозга скрывается множество других очень важных структур. Не все, что находится под поверхностью коры, относится к белому веществу, которое только проводит информацию, – внутри есть «начинка» из серого вещества, разделенная на множество мелких и крупных включений. Такие скопления тел нервных клеток обычно компактно расположены и называются подкорковыми ядрами. Каждая пара ядер внутри мозга – по одному справа и слева – выполняет собственные задачи, образуя сети с другими подкорковыми структурами и участками коры.

Весь мозг представляет собой гигантскую сеть распространения и обработки сигналов, состоящую из десятков миллиардов узлов – отдельных нейронов, сгруппированных в разных отделах подкорки и коры в соответствии с теми задачами, которые они выполняют.

Вообще говоря, именно подкорковые ядра чрезвычайно важны для многих ключевых задач, которые решает мозг, обеспечивая наше выживание и жизнедеятельность. А кора, в свою очередь, отвечает за все наши чисто человеческие функции, которые разительно отличают нас от животных. В коре есть участки, где формируются речь, арифметические навыки, умение читать и способности к абстрактному и логическому мышлению. Кора головного мозга (неокортекс) обеспечивает прежде всего обучение новому.

Тем не менее оказалось, что жить можно и без коры головного мозга (правда, в этом случае речь идет не о людях, а о братьях наших меньших – зверях с более просто устроенным неокортексом). В первой половине XX века ученые проводили эксперименты на животных, изучая как в мозге формируются условные рефлексы и где происходит обучение. В этих экспериментах крысам, кроликам и собакам полностью удаляли кору с поверхности головного мозга, а после восстановительного периода изучали их поведение. Оказалось, что звери вполне способны выжить и прожить довольно долгое время после того, как им полностью удалили кору [2]. Все потому, что базовые программы поведения, включая рефлексы, стандартную повседневную активность и даже мотивацию и настроение животных, кодируют подкорковые структуры мозга.

Что находится внутри полушарий большого мозга?

Промежуточный мозг: таламус, гипоталамус, гипофиз

В основании больших полушарий лежит промежуточный мозг, чью основу составляют таламус и гипоталамус. Это небольшая отдельная часть в составе переднего мозга наряду с конечным – к нему как раз относятся большие полушария и еще несколько структур внутри них.

Мозговой ствол, о котором мы говорили в предыдущем разделе, сверху опирается в два овальных таламуса. Они расположены практически в самой сердцевине мозга и соединяют органы чувств (кроме обоняния) с другими его отделами.

Таламус – своеобразный информационный центр управления внутри переднего мозга [3]. Почти вся информация от органов чувств (за исключением запаховой) сначала попадает в таламус, проходит там начальную обработку и сортировку и только после этого отправляется в свой отдел коры головного мозга. Обоняние – единственное исключение из правил: обонятельные луковицы, отвечающие за вкусы и запахи, относятся к лимбической системе (о ней мы еще поговорим подробнее) и отправляют информацию непосредственно к обонятельной коре в обход таламуса.

Внутри таламуса находится два десятка различных ядер, каждое из которых отвечает за свой набор задач. Часть ядер работает в основном с внешней информацией от органов чувств, другие участвуют в двигательном контроле, есть отделы, соединяющие друг с другом различные участки коры больших полушарий. Что происходит с информацией, которая попала из таламуса в кору? После обработки она опять поступает в таламус, и он вновь оценивает ее, выделяя в огромном сенсорном потоке сигналы, на которые сейчас стоит обратить внимание, и отсеивая те, что пока можно проигнорировать.

Конец ознакомительного фрагмента.

notes

Примечания

1

Карбид чрезвычайно бурно реагирует с водой, выделяя горючий ацетилен и тепло, поэтому эту смесь используют для сварки, а не наполняют ею огнетушители! – Прим. авт.

2

Премия Дарвина – это ежегодная виртуальная антипремия, которую присуждают людям, погибшим самыми идиотскими способами. Таким образом, победители исключают свои гены из генофонда человечества, увеличивая шансы на выживание нашего вида в будущем (это официальный, хоть и не бесспорный критерий присуждения награды, описанный на сайте премии). – Прим. авт.

3

Карликовый шимпанзе. – Прим. ред.

4

Надо сказать, что знание анатомии мозга – ценный навык и полезный маркер/признак, который помогает хотя бы примерно оценить компетентность человека, рассуждающего о мозге. Когда я зарегистрировалась на «Клубхаусе» и стала ходить по разным тематическим комнатам, где обсуждали психологию и связанные с ней темы, обратила внимание на то, что большинство «экспертов», назидательно рассказывающих что-то про нейробиологию, в 99 случаях из ста говорят просто «мозг». «Наш мозг хочет», «мозг решает», «мозг знает», «мозг управляет», «в мозге то», «в мозге это». На мой взгляд, человек, который хотя бы немного понимает в нейробиологии, будет более конкретен в описаниях: «префронтальная кора не может пересилить лимбическую систему, и вы идете на поводу у эмоций», «миндалина сигнализирует об опасности, и вы не можете перебороть страх собеседований», «кора переутомлена, и базальные ганглии включают режим автопилота, вот вы и забываете зайти в магазин после работы». Такие объяснения – тоже упрощения, далекие от точного описания нейробиологических процессов, но все же знание анатомии мозга увеличивает шансы, что человек перед вами более компетентен и примерно понимает, как работает мозг. Это как если человек говорит вам о поломке машины, но не может уточнить, где находится неисправность и какие детали, скорее всего, придется заменить, вы вряд ли поверите, что он автомеханик: вероятно, он обычный профан, и вряд ли стоит всерьез воспринимать его советы. – Прим. авт.

5

Белый цвет белому веществу придает миелин – это что-то вроде изоляции на электрических проводах, только эта изоляция обязательно имеет прорехи (перехваты Ранвье) и образована специальными клетками, оборачивающимися вокруг нервных отростков. Окруженные миелином нервные волокна быстрее распространяют сигнал, который мгновенно перескакивает с одного открытого участка (перехвата Ранвье) на другой, вместо того чтобы медленной волной распространяться вдоль отростка, как это происходит с немиелинизированными нервными волокнами. Такой же принцип использовали китайцы для передачи сигналов вдоль Великой Китайской стены. Вместо того чтобы отправлять гонца с сообщением на многие километры пути вдоль стены, строители оборудовали ее сигнальными башнями; когда кто-то из охранников замечал какую-то угрозу, в ближайшей башне немедленно зажигали огонь, его замечали в соседних башнях, и там тоже появлялись огни. За несколько десятков минут сигнал тревоги распространялся на сотни километров вдоль всей стены. Перехваты

Ранвье работают чем-то вроде сигнальных башен, только сигнал они распространяют не огнями, а перепадами электрического напряжения на мембране (потенциалами действия).

Купить: https://tellnovel.com/belova_elena/avtostopom-po-mozgu-kogda-vsya-vselennaya-u-tebya-v-golove

надано

Прочитайте цю книгу цілком, купивши повну легальну версію: [Купити](#)