

ГЛАВА 5

КАРТЫ В МОЗГЕ

Нам потребовались годы, чтобы сделать вывод о том, что системы отсчета существуют во всем неокортексе, но мы могли бы понять это давным-давно с помощью простого наблюдения. Прямо сейчас я сижу в небольшой гостиной в офисе компании *Numenta*. Рядом со мной стоят три удобных кресла, похожих на то, в котором сижу я. За креслами находятся несколько отдельно стоящих столов. В окно я вижу старое здание окружного суда через дорогу. Изображение этих объектов попадает в мои глаза и проецируется на сетчатку. Клетки сетчатки преобразуют его в спайки. Именно здесь начинается зрение, в задней части глаза. Почему же тогда мы не воспринимаем объекты как находящиеся в глазу? Если стулья, столы и здание суда изображены на сетчатке друг рядом с другом, как я понимаю, что на самом деле они расположены в разных местах? А если я слышу приближающуюся машину, почему я воспринимаю ее как находящуюся в нескольких метрах правее от меня, а не в моем ухе, где на самом деле находится звук?

Это простое наблюдение того, что мы воспринимаем объекты как находящиеся где-то — не в наших глазах и ушах, а в каком-то другом месте, — говорит нам, что в мозге должны быть нейроны, активность которых отражает местоположение каждого объекта, который мы воспринимаем.

В конце предыдущей главы я сказал вам, что мы беспокоились о публикации нашей первой статьи о системах отчета, потому что в то время не знали, как нейроны в неокортексе могут создавать их. Мы предлагали новую важную теорию о том, как работает неокортекс, но эта теория была в значительной степени основана на логической дедукции. Это была бы более сильная статья, если бы мы смогли объяснить роль нейронов. За день до того, как мы отправили заявку на публикацию, я добавил в текст несколько строк о предположении, что ответ может быть найден в более старой части мозга, называемой энторинальной корой. Чтобы объяснить это предположение, обращусь к истории эволюции.

История эволюции

Когда животные впервые начали передвигаться по миру, им нужен был механизм, чтобы определять, в какую сторону двигаться. У простых животных простые механизмы. Например, некоторые бактерии следуют градиентам: если количество необходимого ресурса, такого как пища, увеличивается, то они, скорее всего, будут продолжать двигаться в том же направлении; если количество уменьшается, то они, скорее всего, развернутся и попробуют пойти в другом направлении. Бактерия не знает, где находится; у нее нет

никакого способа представить свое местоположение в мире. Она просто идет вперед и использует простое правило для принятия решения о том, когда поворачивать. Немного более сложное животное, такое как дождевой червь, может двигаться, чтобы оставаться в желаемых пределах тепла, пищи и воды, но он не знает, где именно находится. Он не знает, насколько далеко от него расположена кирпичная дорожка, не знает направление и расстояние до ближайшего забора.

Теперь рассмотрим преимущества животного, которое знает свое местоположение относительно окружающей среды. Животное может вспомнить, где находило пищу в прошлом и какие места использовало в качестве убежища. Затем животное может рассчитать, как добраться из своего данного местоположения в это и другие ранее посещенные места. Животное может запомнить путь, который проделало к водопою, и то, что происходило в различных местах по пути. Знание своего местоположения и местоположения других объектов в мире имеет много преимуществ, но для этого требуется система отсчета.

Напомним, что система отсчета подобна сетке карты. Например, на бумажной карте вы можете найти что-то, используя помеченные строки и столбцы, такие как строка *D* и столбец *7*. Строки и столбцы карты являются системой отсчета для области, представленной на карте. Если у животного есть система отсчета для своего мира, то, исследуя его, оно может отмечать, что обнаружило в каждом месте. Когда животное хочет попасть куда-нибудь (например, в убежище), оно может использовать систему отсчета,

чтобы выяснить, как добраться туда из своего нынешнего местоположения. Наличие системы отсчета полезно для выживания.

Способность ориентироваться в мире настолько ценна, что эволюция открыла для этого множество методов. Например, некоторые медоносные пчелы могут сообщать расстояние и направление, используя форму танца. Млекопитающие, такие как мы, обладают мощной внутренней навигационной системой. В старой части нашего мозга есть нейроны, которые, как известно, изучают карты мест, которые мы посетили, и эти нейроны так долго находились под эволюционным давлением, что максимально успешно справляются со своей функцией. У млекопитающих старые части мозга, где существуют нейроны, создающие карты, называются гиппокампом и энторинальной корой. У людей эти органы размером примерно с палец. По одному их набору есть на каждой стороне мозга, ближе к центру.

Карты в старой части мозга

В 1971 году ученый Джон О'Киф и его ученик Джонатан Достровски поместили электроды в мозг крысы. Электрод регистрировал пиковую активность одного нейрона в гиппокампе. Они смогли записать активность клетки, когда крыса двигалась и исследовала окружающую среду, которая обычно представляла собой большую коробку на столе. Они обнаружили то, что сейчас называют клетками места: нейроны, которые срабатывают каждый раз, когда крыса находится в определенном месте в определенной среде.

Клетка места похожа на отметку «ваше местоположение» на карте. По мере того как крыса перемещается, в каждом новом месте активизируются разные клетки. Если крыса возвращается в то место, где уже была раньше, клетка того же места снова становится активной.

В 2005 году ученые из лаборатории Мэй-Бритт Мозер и Эдварда Мозера использовали аналогичную экспериментальную установку, снова с крысами. В своих экспериментах они регистрировали сигналы от нейронов в энторинальной коре, прилегающей к гиппокампу. Они обнаружили то, что теперь называется клетками координатной сетки*, — клетки, срабатывающие в нескольких местах окружающей среды. Местоположения, в которых клетка сетки становится активной, образуют шаблон. Если крыса движется по прямой, одна и та же клетка сетки становится активной снова и снова через равные промежутки времени.

Детали того, как работают клетки места и координатной сетки, сложны и до сих пор до конца не поняты, но вы можете представить их как создание карты местообитания крысы. Клетки сетки похожи на строки и столбцы бумажной карты, но наложены на окружающую среду животного. Они позволяют животному осознавать свое местоположение, предсказывать, где оно окажется при движении, и, соответственно, планировать свои перемещения. Например, если я нахожусь в местоположении *B4* на карте и хочу добраться до местоположения *D6*, то могу использовать сетку карты,

* В научной литературе это явление описывается также с помощью терминов «нейроны решетки», «клетки сетки».

чтобы узнать, что мне нужно пройти два квадрата вправо и два квадрата вниз.

Но сами по себе клетки координатной сетки не сообщают вам, что расположено в определенном месте. Например, если я скажу, что вы находитесь в местоположении *Аб* на карте, вы не будете знать, что еще там есть по соседству. Чтобы узнать, что расположено в клетке *Аб*, вам нужно посмотреть на карту. Клетки места похожи на детали, напечатанные в квадрате. В каком месте клетки становятся активными, зависит от того, что крыса чувствует в определенном месте. Клетки места сообщают крысе, где она находится, на основе сенсорного ввода, но сами по себе клетки места бесполезны для планирования движений, — для этого требуются клетки координатной сетки. Два типа клеток работают сообща, чтобы создать полную модель окружающей среды крысы.

Каждый раз, когда крыса попадает в какое-либо место, клетки сетки устанавливают систему отсчета. Если это новая среда, клетки координатной сетки создают новую систему отсчета. Если крыса распознает окружающую среду, клетки сетки восстанавливают ранее использованную систему отсчета. Этот процесс аналогичен тому, как вы въезжаете в город. Если вы оглянетесь вокруг и поймете, что бывали там раньше, то достанете правильную карту этого города. Если город выглядит незнакомым, то вы достаете чистый лист бумаги и начинаете создавать новую карту. Прогуливаясь по городу, вы отмечаете на карте то, что видите в каждом месте. Это то, что делают клетки координатной сетки и места. Они создают уникальные

карты для каждой среды. Когда крыса перемещается, активные клетки сетки и места изменяются, отражая новое местоположение.

У людей тоже есть клетки сетки и места. Если вы не полностью дезориентированы, у вас всегда есть ощущение того, где вы находитесь. Сейчас я стою в своем кабинете. Даже если я закрываю глаза, мое чувство местоположения сохраняется и я продолжаю понимать, где нахожусь. Не открывая глаз, я делаю два шага вправо, и мое ощущение местоположения в комнате меняется. Клетки сетки и места в моем мозге создали карту офиса и отслеживают, где я нахожусь, даже когда мои глаза закрыты. По мере моего перемещения активируются разные клетки, отражая мое новое местоположение. Люди, крысы, да и все млекопитающие используют один и тот же механизм для определения местоположения. У всех нас есть клетки сетки и места, которые создают модели мест, в которых мы побывали.

Карты в новой части мозга

Когда в 2017 году мы писали статью о местоположениях и системах отсчета в неокортексе, у меня были некоторые знания о клетках места и координатной сетки. Мне пришло в голову, что местоположение пальца относительно кофейной чашки похоже на местоположение тела относительно комнаты. Мой палец перемещается по чашке так же, как тело по комнате. Я понял, что в неокортексе могут быть нейроны, эквивалентные нейронам в гиппокампе и энторинальной коре. Эти клетки изучают модели объектов

аналогично тому, как клетки места и сетки в старой части мозга изучают модели окружающей среды.

Учитывая роль клеток места и сетки в базовой навигации, можно сделать вывод, что они почти наверняка эволюционно старше, чем неокортекс. Поэтому я решил, что именно неокортекс создает системы отсчета, используя производную от клеток сетки, а не какой-то другой механизм, разработанный «с нуля». Но в 2017 году нам не было известно о каких-либо доказательствах того, что в неокортексе есть что-то похожее на клетки координатной сетки или места, поэтому наша идея была всего лишь предположением.

Вскоре после того как статья была принята, мы узнали о недавно проведенных экспериментах, показавших, что клетки сетки могут присутствовать в некоторых частях неокортекса. (Я расскажу об этих экспериментах в главе 7.) Это обнадеживало. Чем больше мы изучали литературу, связанную с клетками сетки и места, тем больше убеждались в том, что клетки, выполняющие аналогичные функции, существуют в каждой кортикальной колонке. Впервые мы выдвинули этот аргумент в статье 2019 года под названием *A Framework for Intelligence and Cortical Function Based on Grid Cells in the Neocortex*.

Опять же, чтобы изучить полную модель чего-либо, необходимы как клетки места, так и клетки координатной сетки. Клетки сетки создают опорную рамку для указания местоположений и планирования перемещений. Но также нужна воспринимаемая информация, представленная клетками места, чтобы связать сенсорный ввод с местоположениями в системе отсчета.

Механизмы отображения информации в неокортексе нельзя назвать точной копией механизмов, существующих в старой части мозга. Данные свидетельствуют о том, что неокортекс использует одни и те же основные нейронные механизмы, но также подключает некоторые новые методы. Это похоже на то, как если бы природа сократила гиппокамп и энторинальную кору до минимальных размеров, сделала десятки тысяч копий и расположила их рядом в кортикальных колонках. Это стало неокортексом.

Клетки координатной сетки и места в старой части мозга в основном отслеживают местоположение тела. Они знают, где находится тело по отношению к окружающей среде. При этом в неокортексе имеется около ста пятидесяти тысяч копий этой схемы, по одной на каждую кортикальную колонку. Таким образом, неокортекс отслеживает тысячи местоположений одновременно. Например, каждый маленький участок кожи или сетчатки имеет свою собственную систему отсчета в неокортексе. Ваши пять пальцев, прикасающиеся к чашке, подобны пяти крысам, исследующим коробку.

Огромные карты в крошечных пространствах

Как же выглядит модель в мозге? Как неокортекс запикивает сотни моделей в каждый квадратный миллиметр? Чтобы понять, как это работает, давайте вернемся к нашей аналогии с бумажной картой. Допустим, у меня есть карта города. Я раскладываю ее на столе и вижу строки и столб-

цы, разделяющие ее на сто квадратов: *A1* — верхний левый, а *J10* — нижний правый. В каждом квадрате напечатаны объ-екты, которые я могу увидеть в той или иной части города.

Я беру ножницы и вырезаю каждый квадрат, помечая его координатами сетки: *B6*, *G1* и так далее. Также на каждом квадрате я делаю пометку «Город 1». Затем я проделываю то же самое еще с девятью картами, каждая из которых пред-ставляет другой город. Теперь у меня есть тысяча квадратов: по сто квадратов карты для каждого из десяти городов. Я пе-ретасовываю квадраты и складываю их в стопку. Несмотря на то что в стопке целых десять карт, я могу увидеть только один квадрат — верхний. Теперь кто-то завязывает мне глаза и высаживает в случайном месте в одном из десяти городов. Сняв повязку с глаз, я оглядываюсь вокруг. Сначала я не по-нимаю, где нахожусь. Потом вижу, что стою перед фонтаном со скульптурой женщины, читающей книгу. Я пролистываю квадраты своей карты, один за другим, пока не увижу тот, на котором изображен этот фонтан. Квадрат карты помечен как «Город 3», местоположение — «*D2*». Теперь я знаю, в каком месте какого города нахожусь.

Но дальше я могу, например, предсказать, что увижу, если начну перемещаться. Мое местоположение на данный мо-мент — *D2*. Если я пойду на восток, то окажусь в *D3*. Я снова изучаю стопку квадратов, чтобы найти квадрат с надписями «Город 3», «*D3*». На нем изображена игровая площадка. Таким образом, я могу предсказать, с чем столкнусь, если буду двигаться в определенном направлении.

Возможно, я хочу сходить в городскую библиотеку. Я могу поискать квадрат с надписью «Город 3», на котором будет