

**Л. В. Крушинский,
В. Н. Козлов,
В. Б. Кудрявцев**

**О некоторых
результатах
применения
математики к
моделированию в
биологии**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки:
Крушинский Л. В., Козлов В. Н., Кудрявцев В. Б. О некоторых результатах применения математики к моделированию в биологии // Математические вопросы кибернетики. Вып. 1. — М.: Физматлит, 1988. — С. 52–88.
URL: <http://library.keldysh.ru/mvk.asp?id=1988-52>

О НЕКОТОРЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИКИ К МОДЕЛИРОВАНИЮ В БИОЛОГИИ

Л. В. КРУШИНСКИЙ, В. Н. КОЗЛОВ, В. Б. КУДРЯВЦЕВ

(МОСКВА)

При возникновении кибернетики как науки представлялось, что ее средствами удастся решить многие задачи, связанные с исследованием сложных систем, и в первую очередь из таких областей, как техника и биология. К настоящему времени многие из этих задач техники уже решены или находятся в стадии решения. В том же, что касается биологии, успехи кибернетики оказались скромнее. Причины тому, как нам представляется, следующие.

Во-первых, техника была лучше подготовлена, чем биология, и к построению математических моделей, и в целом к проникновению математических методов, которые несла с собой кибернетика. Как правило, задачи и исходные понятия в технике гораздо более четко определены, чем в биологии.

Во-вторых, не будет преувеличением сказать, что в биологии мы имеем дело с самыми сложными системами, известными человеку, со всеми вытекающими отсюда трудностями.

И, наконец, третья причина — в степени адекватности специфике биологии математического аппарата, использовавшегося для моделирования в ней. Наиболее активно используемым в приложениях аппаратом был математический анализ. Именно с ним были связаны успехи в математизации физики, астрономии и т. д. Это предопределило использование аппарата математического анализа и для целей биологии. Аппарат этот оказался удобным в некоторых областях биологии, таких, например, как биохимия и иммунология.

Естественным представлялось и использование дискретной математики для моделирования в биологии. Однако в отличие от непрерывной математики, интенсивно развивающейся уже не одну сотню лет, дискретная математика активно стала развиваться только в последние несколько десятилетий, что, естественно, сказалось на ее применении в биологии.

Тем не менее, если оценивать распространенность математических моделей в биологии, то в различных ее разделах мы обнаружим значительное число моделей, либо прямо базирующихся на тех или иных разделах дискретной математики, либо, условно говоря, дискретных по существу подхода. Эти модели строятся с помощью таких разделов дискретной математики, как k -значные логики, теория графов, теория автоматов, однородные структуры и др.

Использование дискретной математики в биологии можно было бы проследить при движении по различным уровням живого, изучаемым биологией — начиная от клетки, через отдельные органы и системы органов к организму в целом, затем к сообществам животных и, наконец, к эволюционным процессам. Мы сделаем это только для некоторых об-

ластей биологии и для некоторых моделей, причем здесь коснемся и моделей, основывающихся на непрерывной математике. Этому будет посвящена первая часть настоящей статьи. Кроме того, первая часть дает нам возможность в кратком обзоре познакомить математиков и биологов с некоторыми подходами к построению математических моделей в биологии и одновременно высказать некоторые мысли как о достоинствах и недостатках этих подходов, так и о перспективах их развития. Вкратце содержание первой части сводится к следующему. В § 1 рассматриваются нейронные сети, в § 2 — распознавание образов, в § 3 — модели, у которых в основе используемого при их построении аппарата лежит понятие однородной структуры. В § 4 описываются математические модели эволюции, в том числе и использующие теорию графов. В § 5 затрагиваются некоторые вопросы, связанные с непрерывным подходом к математическому моделированию в биологии.

Мысль о важности такого научного направления, как математическое моделирование в биологии, очевидна, но вместе с тем математиков, работающих в биологии, для которых эта работа являлась бы именно основным полем деятельности, сравнительно немного. Эти специалисты условно могут быть разбиты на две группы: одни приходят в биологию из математики, другие сразу готовятся для работы в области математического моделирования в биологии. И первый, и второй пути сопряжены с определенными трудностями.

Переход математика в новую для него область сопряжен с необходимостью изучения соответствующих разделов биологии, накопленного ранее опыта в построении моделей, изучения специфики новой области и т. д. Математик, овладевший соответствующими разделами биологии, при построении математической модели должен преодолеть трудности, связанные с переходом от биологического материала к формальному его описанию. Здесь нет правил, которые гарантировали бы решение этой проблемы в каждом конкретном случае. Поэтому выходить из положения, по существу, приходится изобретением неких подходов к задаче, со всеми сопутствующими такого рода деятельности трудностями. Недаром иногда считают, что изобретение оригинального и плодотворного подхода к задаче построения модели — это едва ли не половина ее решения. Конечно, со временем отдельные находки такого рода, накапливаясь, создадут, возможно, основу для формирования каких-то общих методик, облегчающих переход от биологического материала к математической модели.

Дополнительные трудности для математика создает и отсутствие четких критериев оценки работы. Случаи, когда получается результат, имеющий очевидную биологическую значимость, редки и составляют скорее исключения, чем правило. И это вряд ли можно поставить в вину конкретным исследователям — скорее просто область математического моделирования в биологии еще не вышла на соответствующий уровень и находится в стадии формирования и роста. Свои же внутренние критерии, учитывающие специфику области и уровень ее развития, здесь еще не сложились, что отличает эту область в невыгодную сторону в сравнении с другими областями науки.

Подготовка специалистов непосредственно в области математического моделирования в биологии — путь длинный, и он имеет свои трудности. Прежде всего, этот путь предполагает наличие кадров математиков, уже работающих в биологии, для организации обучения студентов — получается в известной степени замкнутый круг. Выход может состоять в том, что некоторые коллективы математиков и биологов устанавливают между собой контакты и начинают совместную работу в расчете на то, что в результате произойдет своеобразное самообразование математиков в области биологии и, наоборот, биологов в области математики и

вырастут специалисты в области математического моделирования в биологии.

В Московском университете такое сотрудничество осуществлено. В нем участвуют кафедра математической кибернетики факультета вычислительной математики и кибернетики, кафедра дискретной математики механико-математического факультета и кафедра высшей нервной деятельности биологического факультета. Проводится работа по математическому моделированию сложных форм высшей нервной деятельности, изучаемых на кафедре высшей нервной деятельности. Краткому описанию этой работы и будет посвящена вторая часть настоящей статьи. Изложение в некоторых местах может показаться слишком упрощенным для математиков, в некоторых — для биологов. Это происходит из того, что статья рассчитана как на биологов, так и на математиков, и мы стремились быть понятыми и теми, и другими.

ЧАСТЬ I

О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ПОСТРОЕНИЮ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ В БИОЛОГИИ

§ 1. О моделировании структуры и функций нервной системы

Мы начнем с нервной клетки, с нейрона [2]. Нервная система, как известно, состоит из нервных клеток.

В нейроне различают обычно три части (рис. 1): тело клетки, длинный отросток, называемый аксоном, отходящий от одного конца тела, и сильно разветвленные отростки — дендриты. Однако встречается так

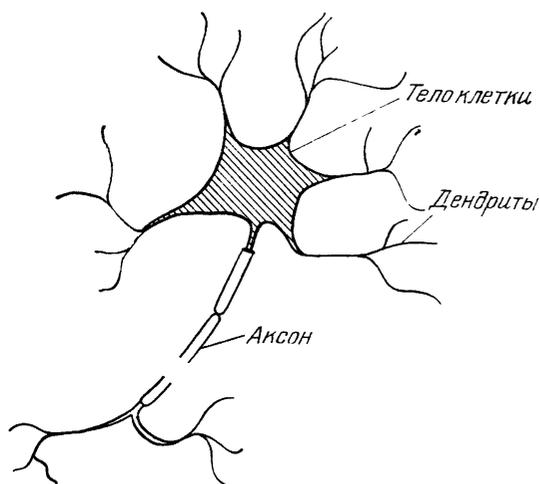


Рис. 1

много исключений из этой общей морфологической схемы, что значение ее довольно ограничено.

Функциональное подразделение нейрона оказалось более строгим. Дендриты составляют часть нейрона, специализированную для приема сигналов от других нейронов. Аксоны приспособлены для передачи импульсов в область, удаленную от зоны дендритов. Обычно аксон — это длинный отросток, от которого могут иногда отходить боковые отростки. Нервное волокно — это длинный аксон. Аксон оканчивается группой концевых разветвлений, которые служат для передачи

сигналов другим нейронам или исполнительным органам. Место контакта аксона с другим нейроном называется синапсом. Тело нейрона выполняет функции, связанные с жизнедеятельностью и ростом клетки.

Основными состояниями нервной клетки являются состояние покоя и состояние возбуждения. В состоянии возбуждения нейрон генерирует нервный импульс, который распространяется по аксону. Нейрон возбуждается нервными волокнами, подходящими от других нервных клеток через места контактов (синапсы), находящиеся на теле и дендритах нейрона. Существуют тормозящие синапсы. Особенностью возбуждения нервной клетки является то, что если сила возбуждения, т. е. количество одновременно возбуждающих нейрон синапсов, не превышает определенного порога, то нейрон не возбуждается. Если же этот порог превзойден, то клетка генерирует нервный импульс, распространяющийся по нервно-

му волокну, причем величина импульса не зависит от того, насколько превзойден порог возбуждения. Импульс распространяется по нервному волокну всегда с одной и той же для данного волокна скоростью.

Таковы основные черты строения и функционирования нервной клетки, которые были приняты во внимание при построении модели нейрона [23, 8]. Нейрон в этой модели изображается обычно так, как это сделано на рис. 2. На этом рисунке треугольник изображает тело нейрона, отросток от одной из его сторон — его аксон (который может разветвляться). Кружочки у тела нейрона изображают места контактов (синапсы) подходящих к телу нейрона нервных волокон от других нейронов, причем зачерненным кружочкам соответствуют возбуждающие синапсы, незачерненным — тормозящие. Нервные волокна, подходящие к телу нейрона, рассматриваются как его входы, аксон — как его выход. Число внутри треугольника — порог возбуждения нейрона. Время дискретно. Если в данный момент времени число активных возбуждающих синапсов больше величины порога, то в следующий момент нейрон возбуждается и по его нервному волокну распространяется импульс. Активность какого-либо тормозящего синапса на теле нервной клетки исключает ее возбуждение в следующий момент времени.

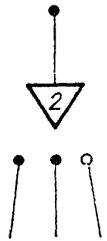


Рис. 2

Из таких нейронов подсоединением их входов и выходов друг к другу получаются так называемые нейронные сети. На рис. 3 изображен пример такой сети. Входами нейронной сети называются свободные входы нейронов сети, т. е. такие входы, к которым не подсоединены выходы других нейронов, выходами сети — свободные выходы, т. е. такие выходы нейронов сети, которые не подсоединены ко входам других нейронов.

Самый простой класс таких сетей — это сети, в которых нет обратных связей, т. е. в таких сетях не существует замкнутых путей, которые можно было бы пройти, двигаясь все время только по направлению распространения нервного импульса.

Возбужденности и невозбужденности некоторого входа или выхода сети можно сопоставить 1 и 0 соответственно. Тогда конфигурации состояний возбуждения и покоя входов сети в некоторый момент времени будет соответствовать набор единиц и нулей. Их можно рассматривать как набор значений аргументов некоторой булевой функции. На выходах сети тоже, можно считать, появляются 0 и 1, которые можно рассматривать как значения некоторых булевых функций на ранее заданном наборе значений аргументов.

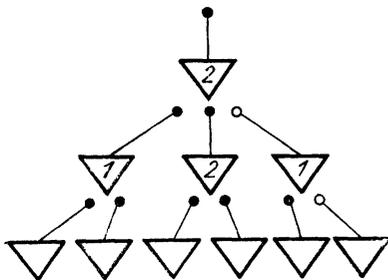


Рис. 3

Если на входах нулями и единицами заданы значения аргументов этой функции, то через некоторое время на заданном выходе сети мы получим значение функции; 2) если взять произвольную сеть описанного вида и взять любой ее выход, то сеть реализуется в указанном выше смысле некоторая булева функция и на рассматриваемом выходе появляются ее значения.

Надо сказать, что такого рода результаты нередко приводят биологов в некоторое, пожалуй, замешательство: если это и ответ на некоторый вопрос, то во всяком случае это ответ на вопрос, который биологи

в явном виде не задавали. Действительно, в чем биологический смысл таких результатов?

На этом примере мы сталкиваемся с ситуацией, общей для математического моделирования в биологии и состоящей в следующем. Математик, исследуя построенную им модель, получает совокупность утверждений, характеризующих как ее общие, так и частные свойства. Эти утверждения, доказываемые строгими рассуждениями, составляют теоремы, леммы, следствия. Их можно разбить на три класса. Утверждения первого класса носят в модели «внутренний», «служебный» характер. Утверждения второго класса имеют биологический смысл, но большей частью не очевидный сразу, и потому требуют истолкования и интерпретаций. И, наконец, утверждения третьего класса имеют очевидный и всем понятный биологический смысл и, в частности, содержат ответы на вопросы, интересовавшие биологов еще до построения модели.

Конечно не всякая, а только достаточно адекватная исследуемому явлению и достаточно «богатая» модель может характеризоваться утверждениями всех трех описанных выше классов. Кроме того, построив модель, мы, конечно, не сразу получаем всю совокупность утверждений, характеризующих ее свойства. Поиск и доказательство этих утверждений — процесс трудный и длительный, так что на каком-то конкретном этапе исследования модели мы можем располагать только частью возможных утверждений и эта часть может целиком попадать в одну из описанных выше категорий утверждений.

Примерами утверждений, имеющих биологический смысл, но не всегда очевидный, и потому требующих истолкования, служат, как нам кажется, описанные выше утверждения о реализуемости булевых функций нейронными сетями. Действительно, о чем они говорят? О том, что сеть из формальных нейронов — из довольно простых моделей — может реализовывать в указанном выше смысле любую функцию алгебры логики, и обратно — на любом выходе нейронной сети реализуется некоторая булева функция. Можно, правда, возразить, сказав, что далеко не все свойства и характеристики реальной нервной клетки учтены в формальном нейроне: реальный нейрон сложнее и богаче свойствами. Однако если он богаче своей модели, то уж по крайней мере так, как эта модель, он работать может, а тогда все, что мы можем сказать про сеть из формальных нейронов, становится приложимым и к сети из реальных нейронов. Дают ли нам в этом случае что-то новое в знании о сетях из реальных нейронов описанные выше утверждения? Безусловно, дают. Действительно, такие утверждения в применении к реальным нейронным сетям отнюдь не очевидны. Их можно предполагать, исходя из общих соображений, базирующихся на том убеждении, что богатые возможности нервной системы в целом основываются на возможностях таких нервных сетей, но в рамках модели это, в сущности, доказываемая.

Дальнейшее развитие теории сетей из формальных нейронов шло по пути включения в рассмотрение обратных связей и представляло собой один из истоков теории автоматов. В теории автоматов рассматриваются сети, состоящие не обязательно из таких простых устройств, как формальный нейрон, а из любых конечных автоматов. Показано, что такие сети могут реализовывать все так называемые регулярные события и только их. Отметим, что реализация булевых функций в указанном выше смысле — это частный случай реализации регулярных событий.

Были попытки представить формальный нейрон в виде более сложного устройства, учитывающего и другие свойства реального нейрона и потому в большей степени имитирующего работу реального нейрона. Можно при этом использовать ранее рассмотренные формальные нейроны, но уже не в качестве моделей нейронов, а как устройства, из кото-

рых конструируется целая сеть, представляющая собой в этом случае модель одного нового нейрона. Затем уже из таких сетей-нейронов можно строить нейронные сети в надежде, что они проявят более богатые свойства, приближающиеся к свойствам реальных сетей. Однако можно показать, что в общем случае такие сети из сложных моделей нейронов обладают такими же возможностями, что и сети из простых формальных нейронов, т. е. на этом пути мы не получаем выигрыша в возможностях функционирования сети нейронов. Этот вывод интересен еще и тем, что является примером того, как теория позволяет предупредить бесполезную трату сил в направлении, не сулящем успеха.

§ 2. О моделировании работы нервной системы. Распознавание образов

Следует, по-видимому, признать, что в целом модели в виде нейронных сетей дали сравнительно немного для понимания принципов работы мозга и нервной системы, во всяком случае гораздо меньше, чем от них ожидалось. Возможно, что эту, в известной степени, неудачу нейронных сетей можно объяснить следующими соображениями.

При изучении сложных систем обычен подход, при котором систему рассматривают как состоящую из некоторой совокупности частей, считающихся элементарными, затем изучают эти части в отдельности, способы их соединения в целое и на этой основе получают результаты о функционировании системы в целом.

Однако если в качестве элементарных взять части, слишком мелкие и простые, то задача изучения системы в целом, по крайней мере для некоторых конкретных систем, может в известной степени потерять смысл. Так, например, здание можно рассматривать состоящим из кирпичей, однако, изучая свойства отдельного кирпича и способы соединения кирпичей друг с другом, мы вряд ли сможем получить общий вид конкретного здания, особенности его архитектуры и пр. Можно высказать несколько утрированное предположение, что нечто аналогичное происходит и при установлении соответствия между свойствами отдельного нейрона как элемента нервной системы и свойствами нервной системы в целом. Продолжая пример с кирпичом и зданием, можно сказать, что, имея только элементарные единицы (кирпичи) и общие правила соединения их друг с другом (правила кирпичной кладки), мы можем что-то сказать лишь в целом о классе объектов, которые таким образом из кирпичей получаются, причем в этом классе будут как разнообразные здания, так и бессмысленные сооружения из кирпичей. Аналогично и в случае нейронных сетей: мы, отправляясь от нейрона и модели нейрона, можем что-то сказать лишь о самых общих свойствах объектов, которые получаются соединением нейронов в сети.

Процессы, происходящие в нервной системе животного при тех или иных его действиях, можно исследовать с различных точек зрения. Можно рассматривать работу конкретных структур мозга, распределение возбужденных и заторможенных нейронов в них, прохождение нервных импульсов по тем или иным связям между нейронами и т. д. Можно, однако, предположить, что все это лишь средство для реализации неких алгоритмов, обеспечивающих в конечном счете то или иное поведение животного. Иногда эти алгоритмы называют механизмами работы нервной системы или просто механизмами нервной системы, принципами работы нервной системы, функциональными механизмами нервной системы и т. д. Конечно, это только названия некоторого понятия и отнюдь не его определения. Однако попытки уточнить смысл обозначаемого этими словами понятия вряд ли сделают его сейчас существенно более конкретным, но несколько схематизируют его, выведя на первый план те

или иные его стороны, и потому в чем-то ненужно упростят и обеднят его.

Очевидно, что очень многие из интересующих нас вопросов о мозге связаны именно с функциональными механизмами нервной системы. Действительно, вопросы о том, как формируются программы того или иного поведения, как осуществляется распознавание образов и пр.— это вопросы выяснения соответствующих функциональных механизмов.

Описать некоторый функциональный механизм — это, в сущности, означает создать некоторую его модель. При этом для того, чтобы соответствующие описания не превращались иногда в не очень ясные и не очень отчетливые словесные рассуждения, они должны допускать, по крайней мере в принципе, машинную реализацию, т. е. реализацию в виде некоторой программы для ЭВМ. Не всегда, конечно, для конкретной модели имеет смысл действительно делать машинную программу, но ориентироваться на создание такой программы, по-видимому, надо хотя бы по той причине, что это с необходимостью заставляет делать рассуждения четкими и доказательными.

Одна из интереснейших способностей живых организмов — способность к распознаванию образов. Суть распознавания проще всего пояснить на примере распознавания изображений. Существуют классы изображений такие, что, познакомившись с некоторыми из изображений данного класса, мы оказываемся способными узнавать все последующие изображения из этого класса. Так, например, познакомившись с несколькими начертаниями буквы А, мы в дальнейшем узнаем ее, написанную разными почерками, напечатанную разными шрифтами, увеличенную, уменьшенную, искаженную и т. п. При этом характерно то, что мы с уверенностью называем предъявляемое нам изображение буквой А, хотя точно такого изображения, какое нам предъявлено, мы, возможно, в прошлом никогда и не видели.

Распознавание не ограничивается только изображениями. Аналогичным образом дело обстоит с распознаванием отдельных звуков или слов. Задачу распознавания решает и врач-диагност, когда по совокупности данных наблюдений за больным и анализом он относит его состояние к той или иной болезни. Нетрудно привести и много других примеров, в которых решается задача распознавания.

Способностью к распознаванию образов в той или иной степени обладают почти все живые организмы. Понять способность к распознаванию — это значит выяснить соответствующие функциональные механизмы организма. Задача распознавания — это характерный пример задачи, решение которой следует, по-видимому, искать в первую очередь именно на уровне функциональных механизмов.

Продвижение в решении задачи распознавания имело бы большую и очевидную значимость для практики. Воспроизведение процесса распознавания образов на ЭВМ резко расширило бы возможности современной техники. Поэтому исследования в области распознавания образов ведутся давно. Ведутся они широко и в первую очередь в интересах практики, поскольку есть потребность хотя бы в неполном, частичном решении задачи распознавания для конкретных случаев. Как следствие в большинстве случаев эта задача решается как не имеющая отношения к биологии, т. е. без привлечения данных биологии и без цели объяснить биологические механизмы этого явления. Тем не менее успехи в этих исследованиях, безотносительно к тому, ориентировались ли они на биологию или нет, несомненно окажутся ценными и для выяснения соответствующих функциональных механизмов в живых организмах.

Можно выделить несколько подходов к решению задачи распознавания образов: геометрический, теоретико-вероятностный, комбинаторно-логический и структурно-лингвистический, которые сегодня наиболее

продвинуты. Первые два подхода объединяют еще под общим названием дискриминантного подхода.

Конечно, не следует считать, что эти подходы являются единственно возможными и что полное решение задачи распознавания может быть найдено на путях развития именно одного из этих подходов. Возникновение этих подходов — результат «изобретательской» деятельности математиков и кибернетиков, и то, что были сделаны именно такие «изобретения», не означает, что не могут появиться новые и, быть может, более эффективные.

Мы начнем описание подходов к задаче распознавания образов с перцептрона [33, 25]. Это устройство можно рассматривать (по крайней мере в самом простом его варианте) как реализацию некоторого частного случая дискриминантного подхода. Вместе с тем надо отметить, что перцептрон, по замыслу его создателей, строился как некоторая модель мозга, и именно эта задача была при его создании на первом плане.

На рис. 4 изображена схема простейшего перцептрона. Сигналы внешнего мира (изображения некоторых фигур) поступают на фотоэлектрическую модель сетчатки — поле рецепторов, состоящее из нескольких сотен фоторецепторов. Если на фоторецептор падает контур проецируемой на поле рецепторов фигуры, то он возбуждается и выдает на выходе 1, в противном случае на выходе фоторецептора выдается 0.

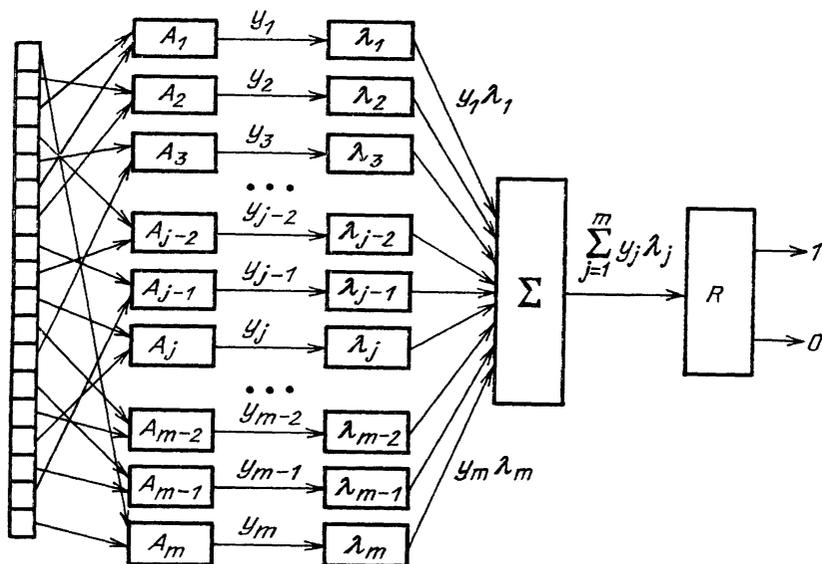


Рис. 4

Выходы рецепторов подключаются ко входам так называемых ассоциативных элементов, или A -элементов. Все A -элементы одинаковы и их примерно столько же, сколько и рецепторов. Выбор рецепторов, подключаемых к данному A -элементу, производится случайно. A -элементы суммируют сигналы, поступившие на их входы, и сумму сравнивают с одинаковой для всех A -элементов величиной — порогом. Если сумма больше порога, то A -элемент выдает на выходе 1, в противном случае — 0.

Выходные сигналы A -элементов с помощью так называемых усилителей умножаются на переменные коэффициенты λ . Эти коэффициенты могут быть положительными, отрицательными, равными нулю и могут меняться независимо друг от друга.

Выходные сигналы усилителей суммируются, и так называемым реагирующим элементом (R -элементом) определяется знак этой суммы.

Если она положительна, то на выходе R -элемента появляется $(+1)$, в противном случае (-1) . Выходной сигнал R -элемента и является выходным сигналом перцептрона.

В описываемом варианте перцептрон предназначен для распознавания двух образов (хотя несложной модификацией схемы его можно переделать для распознавания и большего числа образов). Заранее устанавливаются, что появление на выходе $(+1)$ должно соответствовать изображениям первого образа, (-1) — второго. При обучении перцептрона ему последовательно предъявляются изображения данных двух образов, и, в зависимости от правильности ответа, по некоторым правилам меняются коэффициенты λ . Правила могут быть, например, такими. Если было предъявлено изображение первого образа и перцептрон в своем ответе ошибся, то все коэффициенты λ , стоящие на выходе возбужденных при данном предъявлении A -элементов, увеличиваются на одну и ту же величину Δ . Если было предъявлено изображение второго образа и перцептрон ошибся, то те же коэффициенты λ возбужденных A -элементов уменьшаются на ту же величину Δ . В остальных случаях величины коэффициентов λ не меняются. В результате применения таких правил оказывается возможным за некоторое конечное число шагов процедуры обучения (и это можно доказать строго) привести перцептрон в такое состояние, что он с достаточной уверенностью распознает предъявляемые ему изображения.

Можно отметить некоторые черты сходства перцептрона со структурой и функционированием мозга. Поле рецепторов аналогично рецепторам зрительного аппарата, A -элементы имеют определенное сходство с нейронами, изменение коэффициентов λ соответствует изменению «сопротивления» тех или иных нервных путей. Допущение случайности в характере связей между рецепторами и A -элементами соответствует имеющимся предположениям о том, что в большинстве случаев связи между нейронами мозга имеют случайный характер.

Известно, что мозг обладает способностью сохранять или восстанавливать многие свои функции при серьезных повреждениях, вызванных, например, травмами. Интересно, что и перцептрон оказывается стойким к нарушениям своей структуры (нарушению связей рецепторы — A -элементы, выключению части A -элементов), причем к изменениям такого рода, произведенным как до обучения, так и после него.

Функционирование перцептрона укладывается в рамки дискриминантного подхода к распознаванию образов и, как мы уже отмечали, может рассматриваться как частный его случай. Идея дискриминантного подхода состоит в следующем [28]. Распознаваемый объект представляется в виде n -мерного вектора значений характеризующих его признаков. Пусть, например, задано некоторое изображение на ячеечном экране (рис. 5). Перенумеруем последовательно ячейки экрана слева направо по строке, начиная с верхней строки, и далее вниз. Если экран квадратный и по каждой строке укладывается t ячеек, то, очевидно, первая ячейка в верхнем левом углу экрана будет иметь номер 1 , а последняя, в правом нижнем углу, — номер $t \times t$. Изображение теперь можно представить в виде n -мерного вектора, где $n = t \times t$, состоящего из нулей и единиц, причем соответствующая компонента вектора есть 1 или 0 в зависимости от того, зачернена ли ячейка с соответствующим номером на экране или нет.

Такой n -мерный вектор определяет точку в n -мерном пространстве. Предполагается, что объекты одного образа группируются в соседних точках пространства и составляют некоторую область в пространстве.

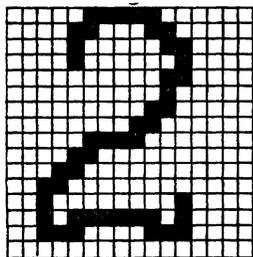


Рис. 5

Если теперь некоторыми поверхностями разделить области пространства, соответствующие разным образам, то задача распознавания неизвестного объекта сводится к определению области, в которой находится точка, соответствующая объекту.

Поверхности, которые разделяют соответствующие разным образом области пространства, находятся с помощью дискриминантных функций. Основное различие между геометрическим и вероятностным подходами как раз и состоит в идеях, на основе которых находятся эти дискриминантные функции.

В рамках структурно-лингвистического подхода [37] распознаваемый объект представляется состоящим из отдельных фрагментов, каждому из которых ставится в соответствие буква некоторого алфавита. Правилам соединения фрагментов в целый объект ставятся в соответствие правила соединения букв в слова и правила преобразования слов. Правила соединения букв в слова подбираются таким образом, чтобы и другие возможные слова, получающиеся при данном алфавите и данном наборе правил, соответствовали объектам, принадлежащим тому же образу, которому принадлежит и исходный объект. Совокупность алфавита и правил образования слов определяет так называемую грамматику, а совокупность слов, которые могут получиться с использованием данной грамматики, называется языком. Тогда вопрос о принадлежности данного объекта заданному образу сводится к выяснению того, является ли слово, соответствующее объекту, словом в языке, соответствующем заданному образу.

Комбинаторно-логический подход к распознаванию образов мы рассмотрим на примере тестового подхода [5, 6, 15]. В рамках этого подхода объект представляют в виде n -мерного вектора аналогично тому, как это делается для описанных выше дискриминантных подходов к распознаванию. Пусть, для примера, есть всего два образа и пусть предъявленный для распознавания объект принадлежит одному из них. Пусть, кроме того, компоненты вектора — 0 или 1. Отметим, что в более общем случае образов может быть больше двух и компонентами вектора могут быть и целые неотрицательные числа, отличные от 0 и 1. Пусть в нашем распоряжении имеется n_1 образцов объектов первого образа и n_2 образцов объектов второго образа. Составим таблицу, строками которой будут векторы образцов: сначала n_1 строчек образцов первого образа, затем n_2 строчек образцов второго образа. На рис. 6 изображен пример такой таблицы для $n = 5$, $n_1 = 3$ и $n_2 = 2$.

Возьмем набор столбцов в таблице такой, что если вычеркнуть остальные столбцы, то в получившейся таким образом новой таблице любая строка из первых n_1 строк будет отличаться от любой строки из нижних n_2 строк. Такой набор столбцов называется тестом, и это понятие составляет основу тестового

1	1	0	1	1
0	1	0	1	1
1	0	1	0	1
1	1	1	1	1
0	0	0	1	1

Рис. 6

подхода к распознаванию образов. Нетрудно видеть, что с содержательной точки зрения тест — это такой набор признаков, который сам по себе, без остальных признаков, позволяет разделить имеющиеся образцы на два класса, принадлежащие разным образам. Тест можно, очевидно, рассматривать как сложный, «агрегатный» признак, приспособленный для нужного деления образцов на классы.

Для предъявленного к распознаванию объекта по заданному тесту можно получить строчку значений признаков, входящих в тест. Эта строчка может совпадать с какой-либо из строчек таблицы образцов с вычеркнутыми, исключая столбцы теста, столбцами. Если совпадение произошло с какой-либо из первых n_1 строчек, то (по данному тесту) объект относим к первому образу, если с какой-либо из оставшихся

n_2 строчек — ко второму. Разные тесты могут относить один и тот же объект к разным образам. В самом простом варианте тестового подхода объект относится к тому из образов, к которому его относит большинство тестов.

Отметим, что тестовый и структурно-лингвистический подходы к распознаванию образов прямо базируются на некоторых разделах дискретной математики. Отметим также, что тестовый подход к распознаванию возник в нашей стране и основные работы в рамках этого подхода выполнены советскими исследователями.

В целом, однако, исследования по распознаванию образов продвинуты еще недостаточно. Алгоритмы распознавания, построенные на основе описанных подходов, удовлетворительно работают лишь в специальных условиях и при многих существенных ограничениях. В этом смысле ЭВМ далека еще от универсальности, надежности и эффективности, например, человека при решении многих задач распознавания.

§ 3. Моделирование на однородных структурах

Интересными для целей моделирования в биологии оказались так называемые однородные структуры [27]. Коротко их можно описать следующим образом. Представим себе плоскость, разделенную на квадратные ячейки. В каждую ячейку поместим конечный автомат, одно из состояний которого есть состояние покоя. Определяется понятие соседства таких автоматов. Если автоматы в ячейках, соседних с данной ячейкой, а также автомат из данной ячейки находятся в состояниях покоя, то в следующий момент времени автомат в данной ячейке тоже будет находиться в состоянии покоя; если какие-то автоматы в соседних ячейках возбуждены, т. е. вышли из состояния покоя, то и автомат в данной ячейке может возбудиться в следующий момент времени. В начальный момент задается некоторая исходная конфигурация из конечного числа ячеек с возбужденными автоматами, последующее изменение этой конфигурации определяется уже только правилами взаимодействия автоматов в ячейках. Все автоматы и принцип соседства соответственно одинаковы для всех ячеек, т. е. эти структуры устроены однородно, что и привело к такому понятию.

Мы описали здесь в качестве примера всего лишь частный случай однородной структуры. Нетрудно сделать переход к более общему случаю. Для этого можно делать обобщения по следующим, например, направлениям: а) можно рассматривать не плоскость, а n -мерное ($n \geq 2$) пространство, поделенное соответственно на n -мерные ячейки; б) в качестве автомата, помещаемого в ячейки, можно рассматривать модификации конечного автомата; в) можно считать, что автомат в данной ячейке меняет свои состояния в зависимости от состояния любой наперед заданной конфигурации автоматов, и т. п.

На однородных структурах можно моделировать многие биологические явления и процессы. Мы коснемся здесь трех подходов к использованию однородных структур для целей моделирования в биологии.

Уже из краткого описания однородной структуры видно, что она удобна для моделирования с ее помощью процессов возбуждения в некоторых биологических тканях, распространения волн возбуждения, их взаимодействия и пр. Уже довольно давно привлекает внимание задача моделирования распространения возбуждений в сердечной мышце. Известно, что сердечная мышца состоит из мышечных элементов, возбуждение на которые, сопровождающееся их сокращением, передается от соседних таких же элементов. Очаг возбуждения, возникнув в некоторых областях ткани сердца, распространяется затем от элемента к элементу, проходя по всей сердечной мышце. Известны интересные факты о взаи-

модействии такого рода волн возбуждения, о патологических режимах работы сердечной мышцы, при которых раз возникшее возбуждение не затухает, а циркулирует по сердечной мышце неограниченно долго. Путем подбора автомата специального вида, помещаемого в ячейку однородной структуры, а также правил взаимодействия автоматов в ячейках, удалось имитировать на однородной структуре некоторые из такого рода процессов в сердечной мышце [14].

Однородные структуры были использованы для моделирования размножения микроорганизмов [22]. Известно, что если поместить микроорганизмы на питательную среду в некотором ограниченном объеме,

то они сначала бурно размножаются, затем отравление ими среды обитания приводит к приостановке размножения, а потом и к массовой гибели микроорганизмов. Соответствующая кривая изменения числа микроорганизмов со временем имеет вид, изображенный на рис. 7. С целью имитации этого явления была создана модель, существенно использующая понятие однородной структуры. Объем, в котором размножались микроорганизмы, изображался выделенной частью трехмерного ячеистого пространства. Живым и погибшим микроорганизмам соответствовали особые выделенные состояния автоматов в ячейках. Задавалось в качестве исходного некоторое начальное число ячеек, изображающих живые микроорганизмы, задавались правила, определяющие переход «нейтральных» ячеек в состояния, соответствующие живым микроорганизмам (правила размножения), и правила, определяющие переход ячеек, изображающих живые микроорганизмы, в состояния, соответствующие мертвым микроорганизмам (гибель микроорганизмов). Эти правила определялись таким образом, чтобы они находились в как можно большем согласии с известными из опыта данными о процессах гибели и размножения микроорганизмов. Предусматривалась также процедура перемешивания микроорганизмов. Модель была реализована в виде машинной программы, с которой были проведены эксперименты на ЭВМ. Результаты машинных экспериментов дали хорошее согласие с данными биологических опытов, продемонстрировав тем самым возможность использования однородных структур для целей моделирования в микробиологии.

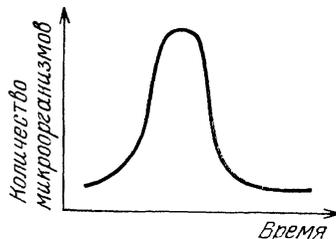


Рис. 7

Первоначально однородные структуры возникли в связи с задачей моделирования явления самовоспроизведения живых организмов. Самовоспроизведение — характернейшее свойство живых существ, и оно, естественно, вызвало попытки понять его и воспроизвести в некоторой модели. Сначала это были попытки описать такое устройство или механизм, который в процессе своей деятельности копировал бы, воспроизводил себя. Однако в такой постановке задача плохо поддавалась формализации и исследованию аналитическими методами. Именно тогда возникла идея однородных структур. Задача самовоспроизведения на однородных структурах выглядит следующим образом [27]. Пусть все автоматы в ячейках однородной структуры в начальный момент времени находятся в состоянии покоя, за исключением конечного числа ячеек, автоматы в которых находятся в состоянии возбуждения. Совокупность возбужденных ячеек образует, очевидно, некоторую конфигурацию. Если теперь по прошествии некоторого времени, на однородной структуре возникают, помимо первоначальной конфигурации, ее копии, то говорят, что первоначальная конфигурация — самовоспроизводящаяся. Показано, что самовоспроизведение конфигураций на однородных структурах возможно.

Конечно, в такой постановке задача самовоспроизведения выглядит несколько отвлеченной. Однако в теоретическом плане она в известном смысле соответствует задаче самовоспроизведения автомата.

Возникнув из задачи моделирования биологических явлений, однородные структуры оказались интересным математическим объектом безотносительно к биологии и вообще к приложениям. Они изучались в качестве такого объекта, и для них был получен ряд интересных математических результатов [30—32]. Некоторые из этих результатов могут, как нам кажется, иметь биологическую интерпретацию и требуют осмысливания с этой точки зрения. В процессе такого осмысливания могут естественным образом возникнуть и новые постановки задач, и новые модели, представляющие интерес как для биологии, так и для математики.

§ 4. О моделировании процесса эволюции

Мы рассмотрим здесь две модели: первая из них — модель дивергенции биологического вида [21], вторая — графовая модель древа эволюции [26]. Выше мы говорили о результатах трех типов, которые получаются при построении моделей в биологии, причем выделяли результаты третьего типа, имеющие явную и очевидную биологическую значимость. На примере этих двух моделей мы сталкиваемся именно с такого рода результатами. Эти две модели являются, на наш взгляд, хорошим примером того, как математическое моделирование может и должно стать инструментом получения данных, имеющих существенный биологический смысл.

Первая из этих моделей возникла в связи с вопросом о причинах дивергенции видов, т. е. о причинах, по которым один вид в своем развитии дает начало нескольким различным видам. Обычно в рассуждениях о причинах дивергенции видов присутствует предположение о той или иной степени географической изоляции частей дивергирующей популяции. Можно представить себе, например, такой механизм этого явления. Некая популяция животных обитает в долине, состоящей из двух частей, разделенных достаточно широким проходом. Этот проход обеспечивает свободное перемещение животных из одной части долины в другую и тем самым позволяет животным популяции свободно скрещиваться. Предположим теперь, что в результате некоторого катаклизма проход оказался засыпанным и сообщение между частями долины прервалось. Каждая из частей популяции развивается теперь в двух образовавшихся долинах независимо друг от друга. По прошествии достаточного времени в двух частях первоначальной долины могут образоваться два отличных друг от друга вида, имеющих ранее существовавший вид своим предком. В таком случае говорят, что произошла дивергенция вида.

Это, конечно, упрощенный и схематизированный пример ситуации, способствующей дивергенции вида. Тем не менее предположение о географической изоляции частей исходной популяции в той или иной форме, как правило, присутствует в рассуждениях о причинах дивергенции видов. Однако если вдуматься в число существующих и тем более ранее существовавших видов, то становится не очень правдоподобным предположение о только таком механизме дивергенции видов. Это следует хотя бы из того, что слишком большое число катаклизмов и катастроф, ведущих к географической изоляции, пришлось бы в этом случае предполагать. Возникает вопрос: не могла ли дивергенция видов происходить иногда в силу чисто статистических причин, без каких-либо влияний внешних (по отношению к популяции) факторов?

Для проверки такого предположения была построена модель в следующем виде. Особь популяции представлялась в виде двоичного вектора (т. е. из нулей и единиц) фиксированной длины. Этот вектор интерпретировался как генотип особи, отдельные его компоненты — как гены. Определялись правила подбора пар особей и правила образования ими потомства. Потомок представлялся также двоичным вектором той же длины, у которого в тех позициях, в которых компоненты родительских векторов совпадали, стояло это их общее значение, в тех позициях, где они не совпадали, — одно из двух возможных значений компоненты выбиралось случайным образом. Совокупность таким образом определенных особей рассматривалась как популяция. Отметим, что правила образования потомства были определены таким образом, что в целом на изменение популяции практически не влияли факторы, которые можно было бы интерпретировать как внешние по отношению к популяции.

Затем определенная таким образом модель реализовывалась в виде машинной программы и прослеживались результаты изменения популяции на протяжении ряда поколений. На ЭВМ просматривались до 90 поколений исходной популяции. Нетрудно подсчитать, что, для примера, применительно к человеку это составляло бы более 2000 лет (исходя из предположения, что поколения отделяют друг от друга примерно 25 лет). Эксперименты проводились при разных исходных популяциях и при разных значениях параметров, которыми характеризуются процедуры подбора родительских пар и образования ими потомства.

Эксперименты показали возможность такого изменения популяции, при котором она в своем развитии делится на группы, причем такие, что между особями одной группы скрещивание возможно, а между особями разных групп — исключено. Такое деление на группы, очевидно, может интерпретироваться как дивергенция исходного вида.

Каков биологический смысл результатов, полученных из этой модели? Можно ответить на этот вопрос следующим образом. При построении модели были сделаны в качестве исходных довольно простые предположения и допущения. Конечно, реальный генотип намного сложнее, чем это представлено в модели, и процесс размножения также характеризуется не столь простыми правилами. В этом смысле реальная ситуация гораздо богаче по свойствам и возможностям, чем рассматриваемая модель. Однако именно в силу этого можно было бы рассматривать модель и ее работу как крайне упрощенный и в известной степени схематизированный вариант действий в реальной популяции. Но коль скоро мы так будем смотреть на соотношение модели и реальной популяции, то можно сделать вывод, что реальная популяция, будучи богаче по возможностям, чем модель, уж по крайней мере как модель себя вести может. В этом случае результаты и выводы, сделанные для модели, могут быть отнесены и к реальной популяции. Это, в свою очередь, означает, что в рассуждениях и построениях, касающихся дивергенции видов, придется учитывать в качестве возможного и такой механизм дивергенции, который осуществляется в силу чисто статистических причин, без какой-либо географической изоляции частей популяции.

Еще раз отметим своеобразие идеи описанной работы: делается гипотеза о возможном механизме биологического явления и машинным экспериментом с соответствующей моделью показывается возможность его осуществления.

Интересным по замыслу представляется подход к моделированию эволюции, использующий теорию графов. Суть подхода состоит в следующем.

Трудами не одного поколения биологов создано так называемое древо эволюции. Различные виды животных, птиц, рыб и т. п. располо-

жены на нем в том порядке, в каком они, как предполагается, произошли друг от друга. Основанием для имеющегося расположения видов на древе эволюции послужила совокупность данных об их строении, функционировании и развитии. При этом виды расположены на древе эволюции в целом тем ближе друг к другу, чем больше у них общих важных черт в строении, функционировании и развитии. Для получения древа эволюции использовались палеонтологические данные, данные изучения устройства тех или иных систем у современных организмов и предположения о наличии аналогичных систем у ранее существовавших видов и пр.— словом, весь комплекс известных биологических данных о строении и функционировании существовавших ранее и существующих ныне организмов различных видов.

Вместе с тем следует, по-видимому, предполагать наличие больших пробелов на построенном к настоящему времени древе эволюции, иногда, возможно, нами даже и не осознаваемых. В первую очередь это связано с тем, что палеонтологические данные в общем случае далеко не полны. Палеонтологические останки организмов многих видов, возможно, еще не найдены, у найденных — не все важные сведения удается восстановить по этим останкам, и, наконец, существовали, возможно, виды, не оставившие сохраняющихся останков.

С точки зрения теории графов древо эволюции — это некоторое древо, частный случай графа. Древо можно представить как совокуп-

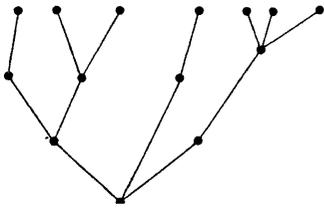


Рис. 8

ность вершин и совокупность ребер, соединяющих вершины. Пример древа изображен на рис. 8. Здесь точки изображают вершины древа, линии между точками изображают ребра древа. Вершины, к которым подходит только одно ребро, называются висячими или концевыми, остальные вершины древа — внутренними. Каждому ребру древа можно приписать число, называемое его весом. Древо с приписанными ребрам числами называется нагруженным деревом.

Можно определить понятие расстояния между любыми двумя вершинами древа следующим образом.

1. Для соседних вершин, т. е. вершин, соединенных одним ребром, расстояние между ними есть число, приписанное соединяющему эти вершины ребру.

2. Для вершин, не являющихся соседними, определяется понятие пути между ними как кратчайшего пути от одной из этих вершин до другой по ребрам древа. Расстояние между этими вершинами определяется как сумма весов ребер этого пути.

Вместе с тем в последние годы благодаря успехам молекулярной биологии появилась возможность оперировать непосредственно наследуемой информацией и рассматривать вместо эволюции организмов как таковых эволюцию их генотипов. Такой взгляд на эволюцию оправдан в силу того обстоятельства, что конкретное устройство организма какого-либо вида можно рассматривать как производное в конечном счете от его генотипа — генотип в этом смысле первичен. Вместо традиционного древа эволюции можно рассматривать тем самым древо эволюции генотипов. На первый взгляд при такой замене мы больше теряем, чем приобретаем: ведь если при прежнем подходе мы для построения древа могли располагать, например, палеонтологической информацией, то теперь мы можем рассчитывать на информацию о генотипах лишь ныне живущих видов.

Вместе с тем появляются и новые моменты, обуславливающие новые возможности. Для генотипов, молекулярная структура которых уже

расшифрована, можно ввести понятие расстояния между генотипами, основывающееся на данных этой расшифровки: чем больше различий в молекулярной структуре двух генотипов, тем больше расстояние между ними.

Итак, если говорить о древе эволюции генотипов, то мы располагаем для него информацией о генотипах лишь ныне живущих видов — информации о генотипах вымерших видов мы не имеем. Древо эволюции генотипов тем самым нам в полном своем виде не известно, и мы располагаем лишь некоторой информацией о нем. Встает вопрос: можно ли по этой информации восстановить древо эволюции генотипов?

Формулируя задачу в терминах теории графов, мы на древе генотипов можем считать заданными только концевые вершины, которым соответствуют современные виды. Кроме того, мы полагаем, что знаем расстояния между генотипами современных видов, т. е. знаем все расстояния между концевыми вершинами дерева. Возникает вопрос: можно ли, располагая только этими данными, восстановить остальную часть дерева? В терминах теории графов задача выглядит следующим образом: можно ли, располагая только совокупностью всяких вершин дерева и совокупностью попарных расстояний между этими вершинами, восстановить дерево и его нагрузку? Показывается, что при определенных условиях на исходные данные это можно сделать, и рассматриваются соответствующие алгоритмы.

На практике задача осложняется тем, что в действительности генотипы современных видов еще не расшифрованы в полной мере. Описанный выше подход был реализован поэтому лишь частично, в той мере, в какой удавалось это сделать на базе имеющихся в настоящее время данных. Сделано это было следующим образом. Рассмотрение генотипов в целом было заменено рассмотрением частей генотипов. Конечно, это как-то изменяет задачу и, возможно, влияет на конечный результат. Вопрос о влиянии подобного рода подмены на конечный результат может, по-видимому, быть предметом специального исследования. Был взят участок генотипа, ответственный у разных видов за синтез глобинов — семейства белков, связанных с транспортировкой кислорода в организме. Но и эти участки в генотипах не расшифрованы в полной мере. Однако расшифрована первичная структура самих белков-глобинов. Если исходить из того, что соответствующие участки ДНК полностью определяют первичную структуру белков, т. е. что на ДНК записана та же структура (в четырехбуквенном нуклеотидном коде), которая имеет место (в двадцатибуквенном аминокислотном коде) и в глобине, то глобин в таком случае можно рассматривать как точный слепок с соответствующего участка ДНК с перекодировкой из четырехбуквенного кода в двадцатибуквенный.

Были взяты данные о структуре примерно 70 глобинов различных видов (начиная от комара и кончая человеком). На основе этих данных было построено древо эволюции соответствующих генотипов. Это древо неплохо согласовывалось с имеющимися данными об эволюции соответствующих видов.

На получившемся нагруженном древе суммированием весов по ребрам соответствующих путей можно было получить расстояние между любыми двумя вершинами дерева, в том числе и расстояние между вершинами, соответствующими современным видам (концевые вершины), и внутренними вершинами дерева, которым соответствуют некоторые гипотетические, возможно, вымершие виды. Очевидно, что этим мы получаем некоторую оценку времени, отделяющего от нас эти гипотетические виды. Однако это время будет выражено в тех абстрактных единицах, которые были приняты при определении расстояния между генотипами. Для того чтобы получить оценку времени в привычных единицах, например

в годах, можно рассмотреть две вершины на дереве, соответствующие тем видам, для которых из независимых, например палеонтологических, источников известно разделяющее их время. Сопоставив это время с расстоянием между этими же видами, определенным по дереву, можно получить искомое соотношение между абстрактными единицами расстояний на дереве и годами.

Была оценена удаленность от нас во времени тех вершин в построенном дереве, которые из содержательных соображений могут интерпретироваться как важные, ключевые в эволюции соответствующих видов. Анализ такого рода позволил выделить три важных момента в эволюции глобинов.

Первому из них соответствуют 650 млн. лет, конец докембрия, время появления морских беспозвоночных. Согласно дереву, в этот период уже происходила спецификация энергетических процессов в мышцах и в остальных тканях (тканевое дыхание отделилось от легочного).

Второму моменту соответствует 380 млн. лет, девонский период, время выхода позвоночных на сушу (появление земноводных). В это время происходила, видимо, существенная ломка прежнего механизма дыхания — переход к дыханию кислородом воздуха через легкие.

И, наконец, третьему моменту соответствуют 150 млн. лет, юрский период, время появления сумчатых. Согласно дереву, в это время происходило, по-видимому, вычленение эмбриональной стадии в индивидуальном развитии млекопитающих.

Можно отметить целый ряд очевидных несовершенств рассмотренной модели. Так восстанавливается здесь, разумеется, не все древо эволюции, а только его часть, поскольку при построении дерева учтены не все существующие виды, а только те из них, для которых расшифрована структура их глобинов. Кроме того, древо восстанавливается отнюдь не по всей генетической информации вида, а только по той ее части, которая определяет структуру глобина. Конечно, еще требуют совершенствования методы, которыми восстанавливается древо по совокупности данных, которыми мы располагаем. В значительной мере неполны и сами эти данные. Требуют совершенствования и определение, например, расстояния между генотипами, используемое в модели, и методы сопоставления абстрактных единиц расстояния и времени. Однако сам подход выглядит интересным. Можно ожидать, что в своем развитии он позволит получить интересную информацию о некоторых внутренних вершинах древа эволюции генотипов, причем это может быть как информация об отдаленности во времени существования видов, соответствующих этим вершинам, так и, возможно, о характере генотипов этих видов. Можно предположить, что в числе видов, о которых, возможно, таким образом будет получена информация, окажутся и такие, палеонтологических останков от которых вообще не осталось — информация о них сохранилась лишь, если так можно выразиться, в растворенном виде в генотипах современных организмов. В этом случае описанный подход может оказаться единственным, который может дать хоть какую-то информацию об этих видах.

В заключение, наряду с другими разделами математической кибернетики, отметим важность теории автоматов [19, 20] в моделировании в биологии. Выше в соответствующих параграфах мы говорили о моделях нервной системы (нейронных сетях), об однородных структурах и моделях на их основе — эти модели прямо базируются на соответствующих понятиях теории автоматов. Очевидно, что в терминах теории автоматов может быть представлена и описанная выше модель эволюции популяции в задаче о причинах дивергенции видов. Более завуалирована в этом смысле графовая модель эволюции, поскольку она имеет внешне статичный характер. Однако можно показать, что и она пред-

ставима в терминах теории автоматов. Такая роль теории автоматов естественным образом вытекает из особенностей понятия автомата и задач моделирования в биологии. Действительно, большей частью явления биологии временные, т. е. протяженные во времени, и имеют характер каких-то преобразований некоторых исходных характеристик в конечные. Это, как правило, хорошо вкладывается в такие общие понятия, как автомат и его функционирование. Для целей отображения геометрии биологических процессов и явлений могут быть использованы однородные структуры.

Конечно, то, что многие модели могут быть более или менее естественным образом переформулированы в терминах теории автоматов, не означает, что это обязательно должно делаться в каждом конкретном случае. Как правило, язык и понятия, которые используются для описания модели, достаточно адекватны ее целям, задачам и уровню сложности. Однако иметь в виду возможность формулирования, вообще говоря, довольно разных моделей в рамках некоторого единого языка важно и полезно. В некоторых случаях это может, например, помочь увидеть единые черты у моделей, подсказать связь некоторых вопросов, ставящихся в рамках модели, с известными результатами в теории автоматов.

§ 5. О непрерывных математических моделях в биологии

Остановимся теперь на непрерывном подходе к моделированию в биологии. Здесь имеются интересные находки, развиваются перспективные разделы и направления. Вопрос использования методов дискретной или непрерывной математики в моделировании — это, конечно же, не вопрос «конкурентной» борьбы, а вопрос целесообразности применения соответствующего математического аппарата, зависящий от ситуации. Можно надеяться, что дискретные методы окажутся во многих случаях адекватными возникающим в биологии задачам. Есть важные области, в которых методы непрерывной математики доказали свою эффективность. В качестве примера можно привести математические модели, возникающие в биохимии при моделировании систем взаимосвязанных биохимических реакций. Другим примером являются модели «гидродинамического» характера, в которых отображается работа кровеносной системы.

Большая работа ведется по построению математических моделей в иммунологии [24]. Это направление является хорошим примером эффективного сотрудничества биологов и медиков с математиками.

В рамках непрерывного подхода модель представляет собой, как правило, схему взаимодействующих компонент, влияние которых друг на друга описывается системой некоторых уравнений, чаще всего дифференциальных. Построение и исследование модели осуществляются обычно следующим образом. На первом этапе для моделируемого явления определяется система характеризующих его переменных и параметров. Эта работа требует содержательного анализа явления, во многом здесь приходится полагаться на интуицию. Затем, с использованием как общих законов, применимых в рассматриваемой ситуации, так и закономерностей, присущих только моделируемому явлению, формируется схема и составляются системы уравнений. Эта схема и системы уравнений и образуют модель. Особую роль здесь играют системы уравнений, которые подлежат исследованию в первую очередь и которые в большинстве случаев поддаются решению лишь с помощью численных методов, т. е. с использованием ЭВМ. Затем проводится некоторая интерпретация полученных результатов.

Из сказанного видно, что непрерывный подход к моделированию удается осуществить в том случае, когда в рамках поставленной задачи есть возможность что-либо численно «уравнивать», т. е. составлять ка-

кие-то балансовые уравнения с использованием выделенных переменных и параметров.

Интенсивно разрабатываемым направлением в математическом моделировании является построение моделей в экологии [3, 34]. В количественном отношении эти модели среди непрерывных моделей едва ли не наиболее широко представлены. Здесь моделируются процессы, возникающие в популяциях, взаимодействие популяций и в целом процессы в биогеоценозах. Направление это берет свое начало от работ В. Вольтерра, выполненных им в 20—30-х годах, и характеризуется тем, что в нем удалось впервые столь близко свести биологию и математику. Эти работы имели многочисленные продолжения, правда, в ряде случаев, разнящиеся лишь по форме.

Возьмем, для примера, простейшую модель этого рода: $dN = \epsilon N dt$. Здесь N — численность некоторой популяции, ϵ — коэффициент ее прироста, t — время. Интегрированием получаем $N = N_0 e^{\epsilon(t-t_0)}$, где N_0 — численность популяции в начальный момент времени t_0 . Это хорошо известный экспоненциальный закон развития видов. При $\epsilon > 0$ получаем увеличение N со временем, при $\epsilon < 0$ — уменьшение, при $\epsilon = 0$ — неизменность N .

В более общем случае может быть не одна величина N , а много их, что соответствует тому, что рассматривается некоторая совокупность, возможно, как-то взаимодействующих популяций. Вместо одного уравнения при этом возникает система уравнений. Правые части уравнений этой системы могут каким-то более сложным образом зависеть от численностей рассматриваемых популяций и, возможно, других имеющихся здесь переменных. Однако то, что будет сказано ниже, может быть отнесено ко многим моделям такого рода.

Об этих моделях можно сделать следующие замечания.

Во-первых, N — численность популяции, т. е. по смыслу величина целочисленная. Между тем в уравнениях фигурирует величина N , которая, очевидно, непрерывна. Следовательно, это разные величины, и одна заменена другой, а именно: в уравнениях рассматривается некоторая непрерывная величина N , целые значения которой должны, по замыслу, совпадать со значениями N — численности популяции. Вопрос о том, насколько безболезненна такая подмена, требует большего внимания, чем это имеет место на самом деле. Ведь в некоторых случаях не очевидно, что такая подмена корректна. Действительно, в тех случаях, когда речь идет о моделировании некоторых биохимических реакций, где в уравнениях фигурирует число молекул или концентрации тех или иных веществ, или в иммунологии, где ситуация аналогичная, такая подмена, если она имеет место, априори выглядит оправданной. Однако в тех случаях, когда речь идет о популяциях, численность которых измеряется тысячами, сотнями, а то и десятками ее членов, вопрос об оправданности такой подмены дискретной по смыслу задачи непрерывной, о том, как дискретная природа задачи сказывается на результатах, полученных для непрерывной модели, заслуживает, по-видимому, специального внимания и исследования.

Второе обстоятельство, пожалуй, даже более существенно и связано с вопросом о том, насколько полно можно отобразить в непрерывной модели реальную экологическую ситуацию. Реальная картина сложна, поведение популяции, например, определяется целым комплексом ее характеристик и процессов, протекающих в ней. Состоит популяция из особей, вообще говоря, разных — разных по возрасту и, следовательно, по опыту, разных по здоровью, силе и пр. Многие в поведении особей определяется временем года, географией местности обитания и многими тому подобными обстоятельствами. При построении же модели в виде

системы уравнений ситуация, как правило, сильно огрубляется. Так, например, число смертей в популяции обычно считают пропорциональным просто общей численности популяции. Неясно, как в рамках этого подхода учесть существенным образом географию местности обитания, такие ее характеристики, как, например, системы возвышенностей и низменностей, массивы растительности, систему озер, рек и связанных с ними водоемов, систему троп животных и т. д. Примерно одного и того же вида модели могут возникнуть и для популяции микробов, и для популяции, скажем, львов. Такие характеристики реальной ситуации «плохо отслеживаются» в непрерывных моделях, они как бы огрубляются, смазываются. В лучшем случае есть возможность учесть их лишь косвенно в значениях некоторых параметров и, возможно, в виде некоторых уравнений, входящих в систему. Можно было бы возразить и сказать, что это, напротив, хорошо — возникают единообразные модели, метод, следовательно, порождает некую общность. Однако это было бы хорошо, если бы мы эту общность получали как требуемый результат. В данном же случае возникает видимость общности, поскольку просто не «отслеживаются» тонкие вещи.

И, наконец, в такого рода моделях все сводится обычно к исследованию характера изменения численности популяции или каких-либо других величин. Если же нужно охарактеризовать, например, иерархию взаимоотношений особей в стаде, охарактеризовать траектории перемещения животных в процессе их жизнедеятельности и т. д., то неясно, как к этому можно было подойти, используя модели в виде системы уравнений.

Следует отметить, что, несмотря на указанные недостатки непрерывных моделей в экологии, сейчас практически нет разработанных альтернативных подходов к математическому моделированию в этой области. Так что здесь этот подход — это все-таки лучшее, что есть у нас в настоящее время.

Предпринимаются попытки использовать однородные структуры для целей моделирования поведения отдельных особей и целых популяций. На однородной структуре подбором автоматов в ячейках и правил их реагирования можно «нарисовать» некоторый ландшафт, причем с необходимой степенью детализации, определить состояниями автоматов в ячейках «животных», правила их перемещения и пр. и затем «проиграть» картину жизни некоторой популяции в некоторой местности. Однако получающиеся при этом конкретные однородные структуры оказываются столь сложными, что практически не поддаются исследованию аналитическими методами и доступны лишь исследованию на ЭВМ. Здесь, по-видимому, целесообразно вести работу поэтапно: пробовать способы «изображения» ландшафта на однородных структурах, затем способы задания перемещения «животных» и т. д., вплоть до задания полной ситуации.

ЧАСТЬ II

О МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕКОТОРЫХ СЛОЖНЫХ ФОРМ ПОВЕДЕНИЯ ЖИВОТНЫХ

§ 1. О концепции элементарной рассудочной деятельности

Человеку в его отношении к живой природе свойствен антропоцентризм. Явно или неявно человек отводит себе в мире живого центральное место. Однако ощущение особой роли человека чревато увеличением отрыва человека от других живых существ. И в самом деле, если обратить внимание именно на черты сходства, то уже при самом беглом взгляде обнаруживается очень много общего у человека и

животных. Так, например, молекулярные механизмы синтеза белка в принципах своих одинаковы у растения, бактерии и человека. А сколько общего в устройстве организма у всех позвоночных: устройство глаз, органов дыхания, систем выделения и т. д. Все живое в природе в конечном счете родственно между собой. Однако исследовать и осознать в полной мере эту истину совсем не просто.

Есть, однако, одна область, которую человек ревниво оберегает и в которой он неохотно признает родство с остальным живым миром. Мы имеем в виду здесь способность к разумным действиям, к рассудочной деятельности. За животными, как правило, признается лишь способность к инстинктивным действиям и к обучению. Все действия животных, иногда довольно сложные и разнообразные, рассматриваются как сложные комбинации действий инстинктивных и действий на основе обучения. Но если быть последовательными, то следует, по-видимому, предположить и в этой области наличие черт сходства у человека с другими живыми существами (по крайней мере с теми, кого мы считаем достаточно высокоразвитыми). Мозг претерпел длительную эволюцию. Трудно себе представить, что те его структуры, которые связаны с мышлением, сформировались только у человека и его ближайших предков.

Если мы обратимся к классикам естествознания, то увидим, что крупнейшие биологи и философы считали, что некоторые элементы разума существуют и у животных.

Ч. Дарвин [4] четко указывал на то, что высшие животные так же, как и человек, обладают памятью, воображением, ассоциацией представлений и разумом. Признание наличия у животных элементарного разума имело для Дарвина принципиальное значение в решении вопроса о происхождении человека. Оно устраняло непроходимую стену между животными и человеком. Дарвин рассматривал естественный отбор как направляющую причину развития не только инстинктов, но и рассудочной деятельности и резко критиковал тех, кто, несмотря на приводимые доводы в пользу наличия у животных разума, тем не менее пытался отрицать это. Он писал: «Утверждать, не обращая внимания на прямые доказательства, что ни одно животное не усовершенствовалось в своих умственных способностях, значит вообще отвергать развитие видов».

Ч. Шеррингтон [38] в конце своей жизни говорил о наличии у животных разума, который, согласно его мнению, управляет рефлекторной деятельностью. Признавая наличие разума у животных и не отрицая возможности его объективного изучения, он, однако, не видел конкретных путей объективного изучения рассудочной деятельности.

Противники признания у животных элементов рассудочной деятельности нередко ссылаются на авторитет И. П. Павлова, якобы отрицавшего наличие у животных каких-либо зачатков конкретного мышления. Действительно, Павлов был последовательным противником антропоморфического метода исследования поведения животных. Он не отрицал наличия элементов мышления у животных, имеющих черты сходства с мышлением человека, однако был противником нефизиологического объяснения этого процесса. Когда в последние годы жизни Павлова в его лаборатории началось изучение поведения антропоидов, он уже совершенно определенно говорил об особом виде ассоциаций, который может быть оценен как конкретное мышление: «А когда обезьяна строит свою вышку, чтобы достать плод, то это «условным рефлексом» назвать нельзя. Это есть случай образования знания, улавливания нормальной связи вещей. Это другой случай. Тут нужно сказать, что это есть начало образования знания, улавливания постоянной связи между вещами — то, что лежит в основе всей научной деятельности, законов причинности и т. д. Я на это хотел обратить внимание» [29].

Из приведенного высказывания Павлова, сделанного за несколько недель до его смерти, ясно видно, что им была предпринята попытка сформулировать то наиболее существенное, что лежит в основе разумной деятельности человека и элементарного мышления животных. И это общее он видел в «нормальной связи вещей», в улавливании причинно-следственных отношений между явлениями внешней среды. Причем Павлов ясно подчеркнул, что улавливание причинно-следственных отношений нельзя назвать условным рефлексом. И этой способностью он в какой-то степени наделял высших позвоночных животных.

Весьма определенно по вопросу эволюции поведения и рассудочной деятельности животных и человека высказался А. Н. Северцов в своей книге «Эволюция и психика» (1922 г.). Основное положение его сводится к тому, что у животных, помимо инстинктов и простых условных рефлексов, существует тип поведения, который может быть охарактеризован термином «разумный». Он полагал, что в низшей форме эти действия подходят под тип простых условных рефлексов, у более высоко стоящих животных они усложняются настолько, что приближаются к действиям, которые у человека обозначаются как произвольные и разумные. Северцов считал, что тип поведения, который можно охарактеризовать как разумный, прогрессивно развивался в эволюционном ряду и явился важнейшим фактором эволюционного прогресса. Здесь интересно, с нашей точки зрения и в связи с описываемой ниже моделью, то, что Северцовым условнорефлекторное поведение рассматривается как частный случай действий, оцениваемых как разумные.

Особое место в истории изучения рассудочной деятельности животных занимают экспериментальные исследования, проведенные в начале века В. Кёлером [7] на человекообразных обезьянах. Эти исследования привели его к выводу, что человекообразные обезьяны способны принимать решения в результате так называемого «инсайта» — проникновения в сущность окружающих явлений. Основным критерием разумного поведения, по мнению В. Кёлера, является решение задачи с учетом всей ситуации в целом.

И. С. Беритов (Бериташвили) [1] пришел к выводу о наличии у животных и человека, наряду с рефлекторной деятельностью (условными и безусловными рефлексами), так называемого психонервного процесса представления, в основе которого лежит возникновение образа местонахождения объекта. Этот образ сохраняется и воспроизводится повторно после однократного восприятия. Образная память, согласно мнению И. С. Беритова, лежит в основе пространственной ориентации.

Говоря далее о рассудочной деятельности, необходимо конкретнее определить то содержание, которое вкладывается в это понятие. Следует отметить, что та форма высшей нервной деятельности, которая оценивается как разумная, весьма многообразна и, вероятно, одним определением трудно охватить все многообразие ее проявлений. Однако из этого многообразия могут быть выделены наиболее существенные черты, характеризующие данную форму высшей нервной деятельности. Предпосылкой для выработки соответствующего понятия и проведения в последующем экспериментальных исследований элементарной рассудочной деятельности животных явились наблюдения за поведением животных в естественных условиях их существования. Эти наблюдения привели к выводу, что животные при выполнении адаптивного поведенческого акта могут использовать улавливаемые ими простейшие эмпирические законы внешнего мира. Адаптивный поведенческий акт, выполняемый животным в новой обстановке на основе оперирования эмпирически уловленными законами, лежащими в основе структуры среды, может быть оценен как рассудочный [16—18].

Наиболее характерное свойство элементарной рассудочной деятельности животных — их способность улавливать простейшие эмпирические законы, связывающие предметы и явления окружающей среды, и возможность оперировать этими законами при построении программ поведения в новых ситуациях.

Можно предположить, что прогрессивная эволюция в животном мире шла в направлении увеличения способности к улавливанию большего числа эмпирических законов природы. Видимо, чем большее число законов, связывающих элементы внешнего мира, улавливают животные, тем более высокой способностью к рассудочной деятельности они, можно считать, обладают.

Рассудочная деятельность не есть результат какого-либо специального обучения. Эта форма адаптивного поведения может осуществляться уже при первой встрече организма с необычной ситуацией, создавшейся в среде его обитания. В том, что животное сразу, без специального обучения, может принять решение к адекватному выполнению поведенческого акта, и заключается уникальная особенность рассудочной деятельности как приспособительного механизма в многообразных, постоянно меняющихся условиях окружающей среды.

Сформулировав положение о том, что наиболее характерной чертой элементарной рассудочной деятельности животных является их способность к улавливанию эмпирических законов, мы должны конкретно назвать некоторые из них.

Наблюдения за поведением животных в естественных условиях их существования привели к заключению, что способность к экстраполяции направления движения раздражителя может рассматриваться как одно из довольно элементарных проявлений рассудочной деятельности животных [17].

В эксперименте способность к экстраполяции оценивалась на основе определения животным пути движения биологически значимого раздражителя, который перемещается прямолинейно с постоянной скоростью. Движение раздражителя на начальном отрезке пути происходило на виду у животного, затем раздражитель скрывался за укрытием. Выяснялось: могут ли животные, несмотря на то, что они перестают воспринимать своим рецепторным аппаратом исчезнувший раздражитель, экстраполировать направление и траекторию его движения.

Общий принцип, лежащий в основе проводившихся опытов, сводился к следующему. Животное должно находить тело A — стимул, двигающийся прямолинейно с постоянной скоростью. Первоначальный отрезок пути движущегося тела находится в поле зрения животного, затем тело A скрывается за преградой. Очевидно, что в таком эксперименте животное способно экстраполировать направление движения раздражителя, если оно может: во-первых, определить из соотношения с неподвижными точками пространства изменение положения тела A (направление его движения в поле зрения животного), во-вторых, определить неизвестную величину — направление движения тела A после исчезновения тела за укрытием.

В соответствии с изложенной общей схемой постановки экспериментов были проведены конкретные исследования способности животных к экстраполяции.

Наиболее удобная методика, дающая возможность изучения способности к экстраполяции практически у всех классов позвоночных, — методика опытов с ширмой. В этих опытах оценка поведения производится на основе альтернативного выбора животным той стороны ширмы, за которой прямолинейно перемещается приманка.

Животное получает информацию о направлении движения корма через поперечную щель, находящуюся в центре непрозрачной ширмы.

Длину ширмы варьируют в зависимости от размеров животного: каждое крыло ширмы в среднем равно двум-четырем длинам его тела. Ширма стоит вертикально. Животное и двигающийся корм находятся по разные стороны ширмы. В зависимости от изучаемого вида животных корм помещают или в кормушку, которая движется по рельсу, или его захватывают зажимом, прикрепленным к стержню, двигающемуся по горизонтали и расположенному вдоль верхнего края ширмы (в этом варианте опыта корм движется за ширмой бесшумно). Рядом с кормушкой (или зажимом с кормом) около ширмы помещают пустую кормушку или зажим.

После того как животное в течение нескольких секунд подкормилось через щель, корм начинает отодвигаться от щели вдоль ширмы. В противоположную сторону двигается пустая кормушка или зажим. Одновременное раздвижение обеих кормушек не дает возможности животному производить выбор направления движения корма, ориентируясь по звуку. Отодвинувшаяся от щели пища, продвигаясь на виду у животного, через 3—5 с скрывается за непрозрачными клапанами, так что дальнейшее ее передвижение не видно животному.

Решение задачи сводится к тому, чтобы животное на основе полученной информации о направлении движения корма сделало альтернативный выбор. При правильном выборе оно обходит ширму с той ее стороны, куда отодвинулся корм. Направление движения корма в каждом последующем опыте меняется. Если животное 4—6 раз подряд обошло ширму со стороны движения корма, стереотип последовательности его продвижения меняется. Если животное правильно решает задачу со сменой стереотипа, задача усложняется.

Имеются такие варианты усложнения задачи.

1. К ширме ставят приставку, направляющую движение животного перпендикулярно к движению приманки. В случае решения и этого варианта задачу еще более усложняют.

2. К ширме ставят сложную приставку. Движение животного на первоначальном отрезке идет в перпендикулярном, а затем и в обратном направлении к направлению движения приманки за ширмой.

При решении усложненных вариантов животному необходимо не только правильно выбрать направление движения приманки, но и сделать поправку на положение своего тела по отношению к двигающемуся раздражителю и окружающей его обстановке экспериментальной камеры.

На рис. 9 представлены фотографии последовательных этапов решения экстраполяционной задачи (непрозрачная ширма со сложной приставкой).

Для исключения роли обоняния проведена серия опытов с животными (кролики, кошки, собаки), у которых перед началом экспериментов были удалены обонятельные луковицы. Опыты показали, что выключение обонятельной рецепции не изменяет способности животных к решению предлагавшихся задач.

Наиболее показательные результаты, позволяющие оценить способность определенного вида или группы животных к экстраполяции, дает первое предъявление задачи и первый обход животным ширмы.

Среди млекопитающих наибольший процент правильных обходов наблюдается у хищных животных из семейства псовых. На первом месте — волки, красные лисицы, затем следуют собаки, корсаки и енотовидные собаки. Кошки по своей способности к экстраполяции должны быть поставлены ниже псовых. Кролики при первом предъявлении задачи на экстраполяцию решают ее хуже, чем кошки. Среди изученных млекопитающих только у полевок не удалось обнаружить тенденции к решению экстраполяционной задачи.

Из птиц наиболее высокий показатель правильных решений наблюдается у вороновых. Голуби, утки и хищные птицы практически не смогли решить экстраполяционную задачу при первом ее предъявлении.

Изученные рептилии (болотные, каспийские и сухопутные черепахи, а также ящерицы) уже при первом предъявлении задачи в большинстве случаев решали ее правильно.

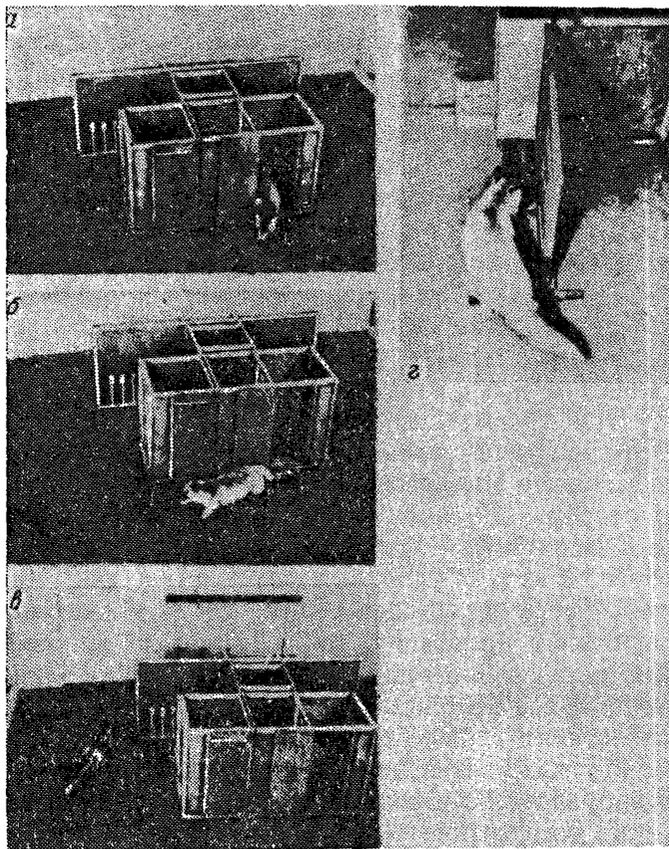


Рис. 9

Рыбы не способны правильно выбрать направление движения корма за ширмой. Бесхвостые амфибии отказывались от решения.

Сравнительное изучение решения экстраполяционных задач показало, во-первых, большое различие по способности к экстраполяции между различными таксономическими группами позвоночных. Видимо, хищные животные не обязательно решают предлагающуюся задачу лучше, чем нехищные. Так, птицы семейства вороновых решают экстраполяционную задачу лучше, чем хищные птицы. Среди вороновых грачи, питающиеся в основном неподвижной или малоподвижной пищей, решали задачу столь же успешно, как и более хищные представители этого семейства. Самым удивительным оказалось то, что сухопутные травоядные черепахи решают экстраполяционную задачу с таким же успехом, как и хищные черепахи.

Во-вторых, среди изучавшихся классов позвоночных, видимо, намечаются параллельные ряды по способности их к экстраполяции. Параллельные ряды можно установить при сравнении млекопитающих и птиц. Среди этих классов животных существуют таксономические группы, которые практически не способны к экстраполяции: полевки — среди млекопитающих, голуби — среди птиц. В то же время в обоих классах существуют группы животных с хорошо выраженной способностью к

экстраполяции. Вороновые птицы сравнимы с исследованными хищными млекопитающими. Между крайними группами в каждом классе распределяются последовательно другие виды изученных животных.

При предъявлении животным какой-либо логической задачи всегда возникает вопрос о роли предшествующего жизненного опыта в успехе решения. Элементарная рассудочная деятельность различных таксономических групп животных оценивалась по их способности к экстраполяции при первом (или первых) предъявлении теста. При многократных предъявлениях задачи представлялась возможность изучить взаимоотношения рассудочной деятельности и обучения при решении экстраполяционной задачи.

В общей форме можно сказать, что многократное предъявление экстраполяционной задачи приводит к постепенному увеличению доли правильных решений.

Однако здесь наблюдается интересное явление, состоящее в том, что среди видов животных, у которых оказались наиболее высокие показатели успеха решений экстраполяционной задачи, по мере дальнейшего ее предъявления отмечалось ухудшение решения. Трудности в решении задачи проявлялись в трех основных формах поведения. Во-первых, в появлении односторонних или беспорядочных обходов ширмы, независимо от направления движения корма. Во-вторых, в появлении боязни (фобии) обстановки опыта. В-третьих, в отсутствие обходов ширмы с какой-либо из ее сторон. Эта форма поведения проявляется в том, что животное беспорядочно ходит перед ширмой или застывает около щели после исчезновения корма из поля его зрения.

Таким образом, у животных, которые успешно решают задачу при первом предъявлении, происходит явное ухудшение решения при последующих ее предъявлениях. Это обуславливается тем, что само решение представляет известные трудности для животного. Оно вызывает резкое возбуждение мозга, после которого появляются отказы от решения задачи.

Исследование биоэлектрической активности мозга [36] показало, что во время первых решений экстраполяционной задачи происходит значительное увеличение частоты и амплитуды колебаний, тогда как при последующих предъявлениях задачи электроэнцефалограмма (ЭЭГ) практически не меняется. У некоторых животных после нескольких (2—5) первых решений задачи были отмечены невротические состояния: двигательное возбуждение, отказы от решения задачи, боязнь обстановки опыта. Нарушения адекватности поведения сопровождались резкими изменениями ЭЭГ, нередко носящими патологический характер.

Электрофизиологические данные говорят о том, что решение логической задачи представляет для животного значительные трудности и может привести к срыву его высшей нервной деятельности. Эти срывы наблюдаются, как правило, только в первый период работы с животными, способными к элементарной рассудочной деятельности. У животных, которые плохо решают задачи или вообще не способны к их решению, нарушений адекватности поведения и ЭЭГ не было обнаружено. У них многократное предъявление теста приводит к постепенному увеличению доли правильных решений за счет обучения.

Можно сделать вывод, что поведение, формирующееся при решении задачи, осуществляется на основе взаимодействия различной способности к экстраполяции и индивидуального опыта. Степень развития элементарной рассудочной деятельности обуславливает тот исходный фон, с которого начинается формирование поведения при участии индивидуального опыта, и ту тактику, которую использует животное для нахождения наиболее адекватного решения задачи.

Способность животных оценивать некоторые геометрические свойства предметов (оперирование эмпирической мерностью фигур) было положено в основу другого критерия оценки их рассудочной деятельности. Предпосылкой для выделения этого параметра высшей нервной деятельности также послужили наблюдения за поведением животных в естественных условиях их существования. Наблюдения дали основание предположить, что некоторые виды животных обладают определенными представлениями о том, что предметы, скрывшиеся из их поля зрения, не исчезают, а могут быть вмещены друг в друга, и что один предмет, находясь внутри другого предмета, может быть перемещен в различные точки пространства.

Отметим, что «эмпирическая мерность» здесь понимается не как размерность в математическом смысле. Имеется в виду лишь то, что объемные и плоские фигуры, оцениваемые этими терминами в обычном понимании людьми, могут быть оценены таким же образом и животными. Способность животных оперировать мерностью фигур определяли следующим образом [17].

Объемную приманку отгораживали от животного непрозрачным экраном, за которым приманку помещали в объемную полую фигуру. Рядом с ней помещали плоскую фигуру. Затем экран убирали, и обе фигуры перемещались в поле зрения животного по прямой линии в разные стороны. Для получения приманки животное должно было выбрать объ-

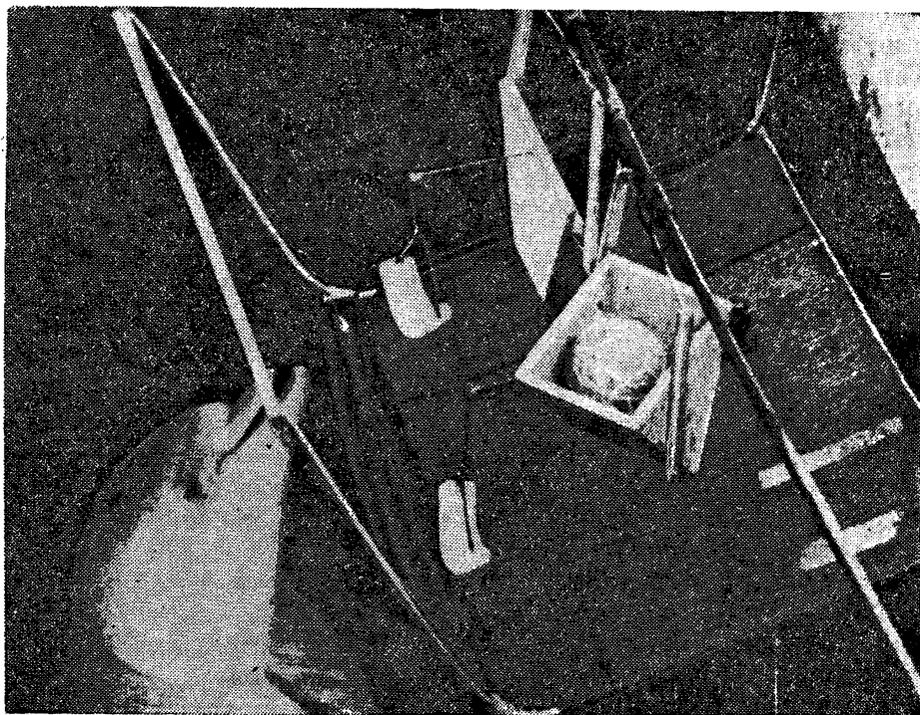


Рис. 10

емную фигуру, в которую может быть помещена приманка. На рис. 10 представлена фотография дельфина перед экспериментальной установкой в описываемых опытах, на рис. 11 — фотографии последовательных этапов (а—г) выбора дельфином объемной фигуры.

Экспериментальное исследование способности животных к оперированию размерностью фигур показало, что этот критерий вполне можно использовать для оценки элементарной рассудочной деятельности. Однако этот тест значительно более труден для животных, чем задачи, предъявляемые при изучении способности к экстраполяции.

Опыты по изучению способности животных к оперированию мерностью фигур подтвердили те же закономерности, которые были обнаружены при предъявлении тестов на экстраполяцию. Тест на оценку способности к экстраполяции более универсален: он позволил определить уровень элементарной рассудочной деятельности у всех классов

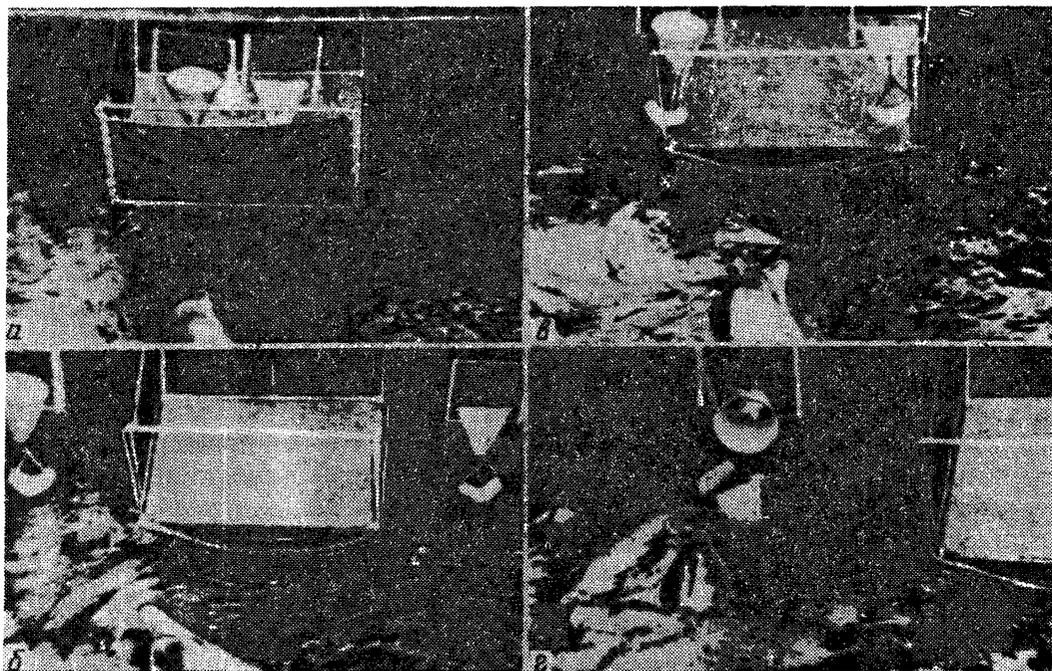


Рис. 11

позвоночных животных, тогда как задача на оперирование эмпирической мерностью фигур может быть предъявлена только животным, обладающим достаточно высокоразвитым интеллектом. Так же, как и при решении экстраполяционной задачи, при решении задач на оперирование мерностью фигур у животных могут развиваться невротические состояния, свидетельствующие о том, что рассудочный акт, даже в своей наиболее примитивной форме, труден для животного.

§ 2. О математическом моделировании элементарной рассудочной деятельности

Выше мы коротко описали явление элементарной рассудочной деятельности у животных и опыты по ее изучению. Какова же может быть роль методов математики в изучении этого явления? Один из возможных ответов на этот вопрос видится нам в описываемом ниже подходе к математическому моделированию элементарной рассудочной деятельности.

Изложим сначала некоторые общие соображения, связанные с нашим подходом.

Очевидно, что работа нервной системы при тех или иных действиях животного — явление многоплановое, и рассматривать его можно на разных, так сказать, уровнях.

Так, нередко рассматривается уровень, который можно было бы назвать блочным, причем в качестве блоков берутся те или иные отделы и части нервной системы: мозжечок, кора, подкорка, те или иные части спинного мозга и т. п. Если при рассмотрении некоторого поведения

животного, от начала его и до конца, мы сможем каким-то образом подробно описать работу всех этих блоков и их взаимодействие между собой, то это будет, с определенной точки зрения, довольно полное описание работы нервной системы при данных действиях животного.

Можно взять и другой уровень рассмотрения. Пусть мы имеем возможность описать состояния всех нервных клеток нервной системы и все прохождения нервных импульсов по нервным волокнам. Положим, что мы сделали это для всех клеток нервной системы при выполнении животным заданных действий. Несомненно, что такое описание работы нервной системы будет также достаточно полным и, с определенной точки зрения, даже более полным, чем первое.

Можно представить себе и еще более детальное описание. Таким оно, очевидно, будет, если мы при выполнении всех заданных действий животным имеем, например, возможность регистрировать и как-то описывать все биохимические и физические процессы, происходящие в каждой из клеток нервной системы.

Можно, однако, предположить, что все эти явления — биохимические и физические процессы в нервных клетках, прохождения нервных импульсов, определенные взаимодействия блоков нервной системы и т. д. — все это есть, в конечном счете, лишь средство для реализации некоторых процедур, по которым информация из внешней среды, с учетом информации, хранящейся в памяти, и потребностей животного, перерабатывается в управляющие воздействия на исполнительные органы. Конечный итог работы этих процедур — некоторое поведение животного, которое мы, собственно, и наблюдаем. Нас, в рамках нашего подхода, интересуют именно эти процедуры или, как их иногда еще называют, функциональные механизмы нервной системы.

Здесь, в дополнение и пояснение к сказанному выше, можно было бы провести аналогию с универсальной ЭВМ, работающей с некоторой программой пользователя. Работа такой ЭВМ — явление также многоплановое, и его можно рассматривать с различных точек зрения и на разных уровнях. Можно, например, рассматривать работу тех или иных полупроводников или целых блоков, прохождения импульсов по тем или иным проводникам и т. д. Каждое такое исследование будет вполне осмысленным с определенной точки зрения. Однако если нас интересует та задача, которая решается на ЭВМ, то наиболее адекватный уровень рассмотрения — это программный уровень или даже процедурный, если под этим понимать ту последовательность правил и действий по ним, которая реализована в программе и с помощью которой решается задача. Эту процедуру можно было бы назвать алгоритмом, если, однако, помнить и оговорить то обстоятельство, что слово «алгоритм» используется также для четко определенного математического понятия. Если же не иметь в виду алгоритм в формальном смысле, то такие последовательности правил и действий можно назвать алгоритмами и соответствующий уровень рассмотрения называть алгоритмическим. Он-то как раз и соответствует интересующему нас уровню функциональных механизмов нервной системы.

Поясним, что дает построение моделей функциональных механизмов для биологии.

Во-первых, модель функциональных механизмов есть реализация некоторой гипотезы о функциональных механизмах, гипотезы о правилах переработки информации в нервной системе при осуществлении данного поведения. Поскольку речь идет о формальной модели, то эта гипотеза тем самым с необходимостью предстает в достаточной степени разработанной, детализированной, т. е. в достаточно конкретном виде, без тех неясностей, которые нередко присутствуют в рассуждениях о работе нервной системы.

Во-вторых, построением формализованной модели, основывающейся на некотором материале биологических исследований, в известной степени проверяются на совместимость, «уживаемость» основные положения этого исходного биологического материала, их непротиворечивость друг другу. На противоречивом материале модель создать невозможно. Те положения, противоречивость которых в рамках «свободного», нестрогого описания может остаться незамеченной, в рамках более строгой модели проявят свою несовместимость.

Естественно предполагать, что в организме на разных уровнях имеется много систем управления, связанных с поведением. Каждую из них можно рассматривать как физическую управляющую систему, являющуюся конкретной реализацией математического понятия управляющей системы, введенного С. В. Яблонским [39]. Можно высказать как гипотетическое предположение о возможном единообразии принципов управления и в организме. Это предположение означает, что управление совершенно различными процессами в организме должно проходить с помощью относительно небольшого числа схем управления. По-видимому, первыми шагами к выявлению таких схем могло бы быть построение более или менее общих моделей, т. е. таких моделей, в рамках которых описывались бы достаточно разнородные стороны жизнедеятельности организма. Именно степень универсальности этих моделей могла бы быть в таком случае косвенным критерием их правильности. Имея в виду эту задачу, мы и пытались найти общий подход к моделированию некоторого круга явлений и процессов в организме.

Целью описываемой ниже работы было построение модели функциональных механизмов нервной системы животного, которые обеспечивают целенаправленное поведение, наблюдавшееся в опытах по изучению элементарной рассудочной деятельности. При этом, в соответствии со сказанным выше об универсальности, мы стремились построить такую модель, с помощью которой можно было бы описать некоторый круг достаточно разнородных сторон жизнедеятельности организма. В рамках получившейся модели оказалось возможным, помимо того, о чем уже говорилось, дать интерпретацию и условному рефлексу; некоторое упрощенное видоизменение модели может использоваться и применительно к задаче распознавания изображений.

Подробно модель была описана в выпусках сборников «Проблемы кибернетики» [9, 10]. Здесь мы ограничимся поэтому лишь ее кратким содержательным описанием.

В основе модели лежит следующая схема действий. По данной ситуации среды выбрать из имеющихся в памяти ситуаций одну в качестве модели среды. Затем, исходя из свойств этой модели, предполагать наличие таких же свойств у ситуации среды и на этой основе осуществлять выбор целенаправленного поведения.

Структурно описываемую модель можно представить в виде устройства, взаимодействующего со средой и состоящего из следующих блоков (рис. 12).

Блок КУ — кодирующее устройство. Результатом его работы является S — код ситуации среды. Код ситуации — пара $\langle M, T \rangle$ множеств. Если, например, ситуация представляет собой некоторым образом расположенные предметы, то M — множество этих предметов, T характеризует их взаиморасположение и представляет собой совокупность всех чисел вида $r(a, b)/r(c, d)$, где a, b, c, d — произвольные предметы из множества M , а $r(a, b)$ и $r(c, d)$ — расстояния между соответствующими предметами. Если ситуация временная, т. е. представляет собой последовательность некоторых событий

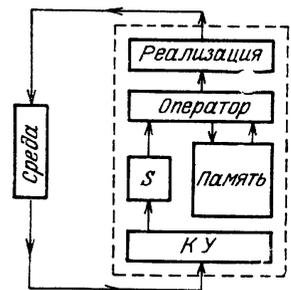


Рис. 12

во времени, то M — множество этих событий, а T — совокупность всех чисел вида $t(A, B)/t(C, D)$, где A, B, C, D — произвольные события из M , а $t(A, B)$ и $t(C, D)$ — временные промежутки между соответствующими событиями.

Память модели — набор кодов некоторых ситуаций, элементам множеств M и T которых приписаны веса, отражающие важность, значимость этих элементов в ситуации. В процессе взаимодействия со средой вес элементов кодов ситуаций памяти перераспределяется с малозначачих элементов на более существенные. В основу механизма этого перераспределения легло предположение о том, что наиболее характерные элементы ситуаций определенного типа — это те, которые в них чаще всего встречаются.

Блок «оператор» реализует некоторую процедуру, по которой происходит работа с информацией, содержащейся в памяти, и определяется «руководство к действию» для данной ситуации в среде. Блок «реализация» содержит эффекторные органы и на основе информации, содержащейся в «руководстве к действию», организует целенаправленное поведение в среде.

Блок «оператор» работает следующим образом. Вводится понятие близости между ситуациями. Для данной ситуации среды производится поиск ближайшей ситуации в памяти и найденная ситуация называется руководством к действию. Объекты ситуации среды и руководства к действию в результате нахождения близости между ними определенным образом сопоставляются друг другу, что и позволяет на основе информации, содержащейся в руководстве к действию, организовать поведение в данной ситуации из среды.

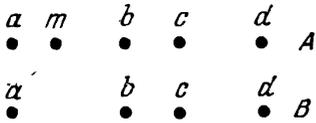


Рис. 13

Пусть, например, руководством к действию является ситуация A (рис. 13), где a, b, c, d — некоторые предметы обстановки, например стол, стул, доска и т. п., m — кормушка с пищей.

Пусть ситуацией из среды является ситуация B , отличающаяся от ситуации A только отсутствием объекта m — кормушки. Отсутствие кормушки в ситуации B может означать, что она чем-то загорожена и потому не видна. Объекты a, b, c, d ситуации B будут при определении близости сопоставлены объектам соответственно a, b, c, d ситуации A . Это позволяет, используя ситуацию A и известное для нее местоположение кормушки m по отношению к объектам a, b, c, d , определить предполагаемое местоположение спрятанной кормушки в ситуации B .

Пусть теперь руководством к действию является временная ситуация \mathcal{H}_1 (рис. 14), а ситуацией из среды — временная ситуация \mathcal{H}_2 . В ситуациях \mathcal{H}_1 и \mathcal{H}_2 точки H_1, H_2 и т. д. изображают некоторые события в отдельные моменты времени, а промежутки между точками соответствуют разделяющему эти события времени. Временные ситуации могут отражать развитие некоторых событий во времени, например движение некоторого раздражителя. Нетрудно видеть, что руководство к действию \mathcal{H}_1 для ситуации из среды \mathcal{H}_2 позволит считать, что в будущем появятся события H_4 и H_5 , и в соответствии с этим прогнозом организовать поведение.

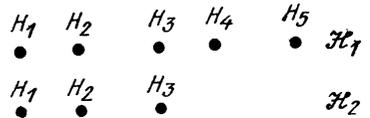


Рис. 14

Отметим, что только для наглядности в приведенных примерах ситуация из среды представляла собой «отрывок» некоторой ситуации из памяти. Для прогноза совсем не обязательно иметь в памяти именно такую ситуацию, фрагмент которой поступает из среды. В ситуации из среды могут отсутствовать по сравнению с ситуацией в памяти какие-то элементы, могут, наоборот, появиться новые, измениться их взаиморас-

положение и т. д. вплоть до прогноза, использующего, в некотором смысле, аналогию ситуаций.

Если расстояние между ситуацией из среды и руководством к действию мало, то действия, предпринятые на основе такого руководства к действию, можно интерпретировать как результат обучения животного. Действительно, ведь если руководство к действию, т. е. ситуация, хранящаяся в памяти, такая же, как и ситуация в среде, или очень близка к ней, то это значит, что животное уже встречалось с такой ситуацией в среде, знакомо с ней и действует на основе знания этой ситуации.

Если расстояние между ситуацией из среды и руководством к действию достаточно велико, то этот случай можно интерпретировать как требующий довольно высокой степени «абстрагирования», поскольку действия предпринимаются на основе ситуации памяти, довольно сильно отличающейся от ситуации в среде. В этом случае животное не располагает сведениями не только о данной конкретной ситуации в среде, но даже и о достаточно похожих на нее. Это, очевидно, соответствует тому, что в опытах по изучению элементарной рассудочной деятельности называлось первым предъявлением ситуации и, следовательно, здесь мы имеем тот случай, который охарактеризован как требующий элементарной рассудочной деятельности.

В такой интерпретации действия на основе обучения и действия, требующие рассудка, оказываются как бы разными полюсами одного функционального механизма. Действия на основе обучения при этом можно рассматривать как частный и, в некотором смысле, примитивный случай работы того же механизма, который обеспечивает и действия, требующие рассудка.

До сих пор мы не делали различий между разными животными, полагая, что в том приближении, в котором наша модель может отражать реальное положение дел, функциональные механизмы, обеспечивающие поведение, едины для всех животных. Поставим теперь целью отразить некоторым образом различие между животными в способности к элементарной рассудочной деятельности. Для этого достаточно ввести некоторый параметр R_0 и считать, что ситуация A в памяти может быть взята в качестве руководства к действию для ситуации B из среды только в том случае, если $R(A, B) < R_0$. Очевидно, что если R_0 , например, мало, то модель не будет способна использовать в качестве руководства к действию ситуации из памяти, достаточно далекие от данной ситуации среды. Модель, следовательно, сможет действовать только в тех случаях, когда для ситуации среды есть мало отличающаяся от нее ситуация из памяти, а это, в сущности, означает, что ситуация среды встречается не в первый раз. Следовательно, в этом случае модель не сможет действовать при первом предъявлении новой ситуации, т. е. именно в тех случаях, которые требуют элементарной рассудочной деятельности.

Напротив, если R_0 достаточно велико, то в качестве руководства к действию могут использоваться ситуации, довольно далекие от данной ситуации в среде. Интересно, что в силу этого обстоятельства случаи, когда для данной ситуации среды не найдется руководства к действию, будут относительно редки. Это согласуется с тем, что в многообразной меняющейся среде рассудочная деятельность обеспечивает наиболее адекватное поведение.

Если прогноз, осуществленный на основе выбранного руководства к действию, оказался ошибочным, то ситуацию среды записываем в память как новую. Таким образом память может пополняться новыми «моделями среды». Кроме того, как уже говорилось, веса элементов ситуаций памяти в процессе взаимодействия со средой меняются и при этом выделяются наиболее значимые, существенные элементы ситуаций.

Рассмотрим теперь, как представляется в модели условный рефлекс. Пусть в памяти записана временная ситуация ABX_1X_2C , где AB есть то, что называют условным раздражителем, а в C происходит подкрепление. Через X_1, X_2 обозначены те элементы, которые могут меняться от ситуации к ситуации. Процесс выработки условного рефлекса состоит в предъявлении n раз условного раздражителя AB с последующим подкреплением. В наших понятиях это есть не что иное, как повторение n раз ситуации ABX_1X_2C . При этом происходит увеличение весов соответствующих элементов ситуации в памяти. Рис. 15 частично иллюстрирует этот процесс: возрастание веса элемента буквы изображается увеличением ее размеров. Если теперь в памяти и есть какая-либо ситуация, тоже начинающаяся с AB (например, ABF_1F_2N), то при возникновении в среде AB в качестве руководства к действию будет взята не она, а ситуация ABX_1X_2C .

Ситуации среды	Ситуации в памяти
ABK_1K_2C	ABX_1X_2C
ABL_1L_2C	ABX_1X_2C
ABD_1D_2C	ABX_1X_2C

Рис. 15

Следовательно, прогнозироваться будет именно раздражитель C с соответствующими последствиями в поведении.

Если же, предъявляя условный раздражитель AB , не давать подкрепление C , то веса соответствующих элементов будут уменьшаться. В конце концов, при предъявлении AB перестанет доминировать ситуация ABX_1X_2C (угасание условного рефлекса).

Безусловный рефлекс будет очевидным образом отражен в модели, если положить некоторое подмножество множества ситуаций памяти априори заданным («наследственно обусловленным»), причем распределение весов на этих ситуациях положить заданным и не меняющимся.

Близость между ситуациями вводится следующим образом. Пусть даны ситуации $A = \langle M_A, T_A \rangle$ и $B = \langle M_B, T_B \rangle$, $|M_A| = n$, $|M_B| = m$ и $n \geq m$ ($|M_A|$ и $|M_B|$ — мощности множеств M_A и M_B). Рассмотрим некоторое отображение $\psi: M_B \rightarrow M_A$. Основываясь на содержательных соображениях, можно ввести некоторый класс \mathcal{P} функций близости p_i ($i = 1, \dots, k$) ситуаций, каждая из которых учитывает те или иные особенности ситуаций при оценке их близости. При этом полагаем, что для каждого i каждому элементу x кода любой ситуации приписано некоторое число $\xi_i(x)$ — вес этого элемента при оценке i -й близости. Затем над классом \mathcal{P} можно ввести некоторую «интегральную» функцию близости, учитывающую в совокупности свойства, описываемые отдельными функциями из этого класса. Мы полагаем класс \mathcal{P} состоящим из трех функций p_1 , p_2 и p_3 . Функция p_1 оценивает количество и значимость сопоставленных друг другу при данном отображении ψ элементов из множеств M_A и M_B . Функция p_2 оценивает число однотипных элементов множеств M_A и M_B , сопоставленных друг другу. Функция p_3 оценивает сходство во взаиморасположении объектов, из которых состоят ситуации A и B .

Каждая из функций p_1 , p_2 , p_3 задается системой аксиом. Эти аксиомы получаются из содержательных соображений, связанных с анализом поведения. Общая близость $P(A, B)$ между ситуациями определяется как $P(A, B) = \max(p_1 + p_2 + p_3)$, где максимум берется по всем возможным отображениям $\psi: M_B \rightarrow M_A$.

При исследовании модели нами получен ряд утверждений, характеризующих ее свойства. Мы ограничимся здесь лишь содержательной интерпретацией соответствующих аналитических результатов.

Показано, что код ситуации не меняется при сдвиге, повороте, подобном преобразовании и преобразовании симметрии ситуации как цело-

го, т. е. модель как бы «не замечает» этих преобразований ситуации. В определенном смысле можно считать, что модель оценивает ситуацию объективно, т. е. оценивает ситуацию и только ее. Ведь указанные преобразования можно заметить только в том случае, если есть некоторые, причем внешние по отношению к ситуации, системы отсчета. Но в таком случае необходимо считать, что рассматривается не данная ситуация, а нечто большее, так как система отсчета должна быть привязана к некоторым объектам, которые не входят в ситуацию.

Показано, что функции p_1 , p_2 и p_3 могут быть только монотонными функциями от аргументов некоторого специального вида. Содержательный смысл соответствующих предложений состоит в том, что в рамках сделанных при построении модели допущений вид функций, которые могут быть использованы при определении близости между ситуациями, не произволен, а вполне четко предопределен.

Не всегда необходимо знать точное значение близости между ситуациями — иногда достаточно иметь только ее оценку, т. е. границы, между которыми располагаются значения близости. Эти границы зависят от некоторых особенностей ситуаций и могут быть справедливыми для целых классов ситуаций, обладающих этими особенностями. Некоторые из таких оценок для модели получены.

Вычисление близости представляет собой некоторую процедуру. Вводится понятие сложности вычисления близости между ситуациями, которую можно интерпретировать как трудность принятия решения, отражающую реальную трудность при оперировании с ситуациями. Получены оценки сложности. В общем случае сложность довольно велика. Однако можно ограничить класс рассматриваемых ситуаций только такими, которые в определенном смысле «разумно» устроены по отношению друг к другу (этой разумной устроенности можно дать строгое определение). В этом случае сложность существенно понижается.

Мы полагали до сих пор память заполненной лишь «моделями среды» внешней, что позволяет отразить процесс формирования программы поведения во внешней среде. Можно дополнить модель предположением, что по такой же схеме происходит управление и внутренними процессами в организме, т. е. работой внутренних органов. В этом случае следует полагать, что в памяти находятся и ситуации внутренней среды, выступающие в качестве ее моделей. Так же, как и в предыдущем случае, можно полагать, что часть из этих ситуаций приобретает посредством опыта, а часть — «врожденная», т. е. априори заданная. Конечно, такое расширение модели требует уточнения и детализации в дальнейшем многих моментов: как кодируются ситуации внутренней среды, как взаимосвязаны ситуации внутренней и внешней среды и т. д. Взаимосвязь, например, ситуаций внутренней и внешней среды, по-видимому, должна существовать: ведь, очевидно, только условно мы можем подразделять некоторое поведение на «внешнюю» его часть, т. е. на действия во внешней среде, и на «внутреннюю» часть, т. е. соответствующую последовательность изменений внутренней среды и работу внутренних органов. Отметим как интересную особенность то, что в рамках такой модели в принципе возможно использование (по аналогии) ситуаций внутренней среды для формирования программ поведения во внешней среде и наоборот.

В рамках описанной модели мы полагаем функциональные механизмы нервной системы в основных своих чертах едиными у разных животных. Теперь следует еще раз коснуться вопроса о том, как в рамках такой единой схемы могут возникать те существенные различия в поведении у разных животных, которые в действительности наблюдаются. Отчасти эти различия могут возникать в модели за счет разных значений параметров, таких, например, как описанный выше параметр

R_0 — максимальное расстояние между ситуациями, одна из которых может служить руководством к действию для другой. Возможно, однако, что еще более существенные различия могут возникать за счет различий памяти, т. е. в зависимости от того, как и чем заполняется память. Каковы же могут быть причины возникновения различий памяти?

Разные животные имеют, как правило, по-разному устроенный организм. Различия в устройстве организма приведут и к различиям в поведенческом опыте. Действительно, одни поведенческие программы будут формироваться в том случае, если пользоваться, например, двумя ногами, и, очевидно, другие — если четырьмя. Аналогичные различия возникнут в зависимости от того, пользоваться ли зубами или руками, летать ли в качестве основного средства передвижения или ползать и т. д.

Однако существенно больше различий между разными животными, различие между человеком и животными. Возможно, мозг человека не имеет каких-либо особых механизмов, делающих его столь отличным от животных. Некоторыми доводами в пользу этого может служить то, что мозг человека, как полагают, по своему, так сказать, устройству почти не изменился с древнейших времен, когда человек во многих отношениях был гораздо ближе к животным; или, например, то, что если человека с раннего детства поставить в те же условия, что и животных, то он мало от них будет отличаться. Достаточно вспомнить в качестве примера детей типа «Маугли», воспитанных животными.

Итак, основные механизмы мозга у животных и у человека, как мы полагаем, весьма схожи, живут они в одном и том же мире, но ведь отличаются разительно. Можно предположить, что ошибка здесь во втором допущении, а именно в том, что люди и животные живут в одном мире. В некоторых случаях различие в средах очевидно. Действительно, в одном мире живет человек, в совсем другом — глубоководная рыба и в третьем — птица. Разные среды ставят перед ними разное количество и разной сложности задачи. Соответственно формируется и разный опыт.

Известно тем не менее, что даже животные, живущие среди людей (например, собаки), не приобретают человеческих способностей, хотя, казалось бы, среда обитания человека и животного в этом случае одинакова. Однако разные организмы, живя в одной и той же среде, могут иметь дело с разными ее частями, видеть ее как бы с разных сторон и фактически иметь дело с сильно отличающимися средами. В качестве примера можно привести собаку и ее хозяина на прогулке. Они проходят по одной и той же улице, но интересуются совершенно разными ее, так сказать, участками. Соответственно и представление об улице у них, можно предполагать, складывается разное.

Еще существеннее то обстоятельство, что для человека среда — это в значительной мере то окружение, то общество, в котором он живет. Именно жизнь в обществе ставит перед человеком особые задачи, заставляет преодолевать множество барьеров. А ведь именно то, какие задачи приходится решать, сколько и какой сложности барьеры приходится преодолевать, и формирует опыт, т. е. содержание памяти. Вместе с тем можно предположить, что среда эта очень специфическая, созданная человеком и приспособленная именно к нему. Многие ее черты, возможно, определяются и устройством организма человека, и содержанием памяти, а память — это и программы внутренней среды, которые (по аналогии) могут использоваться при формировании некоторых поведенческих программ. Именно это может быть одной из причин того, что щенок собаки не приобретает способностей человека, даже если его воспитывать вместе с детьми человека.

В одном из высказываний А. Н. Колмогорова упоминается о мыслящей плесени (если бы такая могла быть) как о примере разумного

существа, в корне отличающегося от человека. Если вообразить общество таких существ и попавшего туда ребенка человека, то трудно представить, чтобы он смог воспользоваться их средой, их обществом для своего развития. Возможно, что щенок собаки находится в обществе людей в аналогичном положении.

В заключение сделаем одно существенное замечание. Мы описали некоторую модель, но, конечно, не полагаем, что функциональные механизмы нервной системы, осуществляющие интересующие нас формы поведения, в точности такие, как это следует из модели, что именно так, например, как это делается в модели, подсчитываются расстояния и т. д. Хотелось бы лишь надеяться, что уловлены некоторые из общих черт таких механизмов, что верны, например, идея и общая схема модели. Возможно, что последующая работа над моделью сильно изменит ее и настоящая модель будет соотноситься с итоговой лишь как набросок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бериташвили И. С. Память позвоночных животных, ее характеристика и происхождение.— М.: Наука, 1974.
2. Вилли К. Биология.— М.: Мир, 1964.
3. Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование.— М.: Наука, 1976.
4. Дарвин Ч. Сочинения, т. II.— Спб, 1896.
5. Дмитриев А. И., Кренделев Ф. П., Журавлев Ю. И. О математических принципах классификации предметов и явлений // Дискретный анализ. Вып. 7.— М.: ИМ СО АН СССР, 1966.
6. Журавлев Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания и классификации // Проблемы кибернетики. Вып. 33.— М.: Наука, 1978.— С. 5—68.
7. Кёлер В. Исследование интеллекта человекоподобных обезьян // М.: Изд-во Комакад, 1930.
8. Клини С. К. Представление событий в нервных сетях и конечных автоматах // Автоматы.— М.: ИЛ, 1956.
9. Козлов В. Н. Рефлексы, модели поведения и распознавание образов // Проблемы кибернетики. Вып. 28.— М.: Наука, 1974.— С. 223—238.
10. Козлов В. Н. Модели поведения и распознавание образов // Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова.— 1974.— № 2.
11. Козлов В. Н. О математическом моделировании элементарной рассудочной деятельности // ДАН СССР.— 1981.— 259, № 2.
12. Козлов В. Н. О математическом моделировании некоторых сложных форм поведения // Проблемы кибернетики. Вып. 39.— М.: Наука, 1982.— С. 223—256.
13. Козлов В. Н. Об одной модели прогнозирования и распознавания в нервной системе // Математические методы в биологии.— Киев: Наукова думка, 1982.
14. Колотов А. Т. Автоматная модель сердца // Проблемы кибернетики. Вып. 20.— М.: Наука, 1968.
15. Константинов Р. М., Королева З. Е., Кудрявцев В. Б. Комбинаторнологический подход к задачам прогноза рудоносности // Проблемы кибернетики. Вып. 31.— М.: Наука, 1976.— С. 5—33.
16. Крушинский Л. В. Изучение экстраполяционных рефлексов у животных // Проблемы кибернетики. Вып. 2.— М.: Физматгиз, 1959.— С. 229—282.
17. Крушинский Л. В. Биологические основы рассудочной деятельности.— М.: Изд-во МГУ, 1977.
18. Крушинский Л. В. и др. Экстраполяционный рефлекс и его роль в эволюции животных // Проблемы кибернетики. Вып. 16.— М.: Наука, 1966.— С. 91—114.
19. Кудрявцев В. Б. Лекции по теории автоматов.— М.: Изд-во МГУ, 1976.
20. Кудрявцев В. Б., Алешин С. В., Подколзин А. С. Элементы теории автоматов.— М.: Изд-во МГУ, 1978.
21. Кулагина О. С., Ляпунов А. А. К вопросу о моделировании эволюционного процесса // Проблемы кибернетики. Вып. 16.— М.: Наука, 1966.
22. Лупанова Н. Б. Об одной автоматной модели роста популяции микроорганизмов // ДАН СССР.— 1979.— 249, № 3.
23. Маккаллоу У. С., Питс У. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // Автоматы.— М.: ИЛ, 1956.
24. Марчук Г. И. Математические модели в иммунологии.— М.: Наука, 1980.
25. Минский М., Пейперт С. Перцептроны.— М.: Мир, 1971.
26. Миркин Б. Г., Родин С. Н. Графы и гены.— М.: Наука, 1977.
27. Мур Э. Ф. Математические модели самовоспроизведения // Математические проблемы в биологии.— М.: Мир, 1966.

28. Нильсон Н. Обучающиеся машины.— М.: Мир, 1967.
29. Павлов И. П. Павловские среды, т. III.— М.— Л.: Изд-во АН СССР, 1949.
30. Подколзин А. С. О сложности моделирования в однородных структурах // Проблемы кибернетики. Вып. 30.— М.: Наука, 1975.
31. Подколзин А. С. О поведении однородных структур // Проблемы кибернетики. Вып. 31.— М.: Наука, 1976.
32. Подколзин А. С. Об универсальных однородных структурах // Проблемы кибернетики. Вып. 34.— М.: Наука, 1978.
33. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики.— М.: Мир, 1966.
34. Свирежев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ.— М.: Наука, 1978.
35. Северцов А. Н. Эволюция и психика.— М.: Сабашниковы, 1922.
36. Семиохина А. Ф., Очинская Е. И., Рубцова Н. Б., Крушинский Л. В. Невротическое состояние у животных, вызванное перенапряжением их элементарной рассудочной деятельности (по данным ЭЭГ) // ДАН СССР.— 1976.— 231, № 2.
37. Фу К. Структурные методы в распознавании образов.— М.: Мир, 1977.
38. Шеррингтон Ч. Интегративная деятельность нервной системы.— Л.: Наука, 1969.
39. Яблонский С. В. Основные понятия кибернетики // Проблемы кибернетики. Вып. 2.— М.: Физматгиз, 1959.