



НАУКИ ОБ
ИСКУССТВЕННОМ

Herbert Simon

THE SCIENCES OF THE ARTIFICIAL

Г. Саймон

НАУКИ ОБ ИСКУССТВЕННОМ

Перевод с английского
Э.Л. Наппельбаума

Издание второе

Москва



УРСС

Психология мышления. Как искусственное вырастает в естественное

Взгляните на муравья, совершающего утомительный путь по песчаному берегу, на котором ветер и волны оставили свои следы. Сначала он ползет вперед, затем сворачивает вправо, чтобы легче было взбираться на крутой песчаный барашек, огибает гальку и на секунду замирает, чтобы обменяться информацией со своими сородичами. Из таких элементов складывается его петляющий и неуверенный путь домой. Не будем антропоморфистами и не станем фантазировать, каковы «задачи» муравья, а просто зарисуем его путь на клочке бумаги. Получится последовательность нерегулярных ломаных отрезков, которую тем не менее нельзя назвать случайным блужданием, ибо в ней явно просматривается какое-то чувство направления, стремление к какой-то цели.

Такой рисунок без какой-либо подписи я как-то показал другу. Что тут нарисовано? След опытного горнолыжника, спускающегося по крутой и довольно каменистой трассе? Или след парусного суденышка, плывущего против ветра по водному пространству, усеянному островами и отмелями? А может, это траектория в более абстрактном пространстве — путь поиска студента, пытающегося доказать геометрическую теорему?

Но кому бы ни принадлежала траектория и в каком бы пространстве она ни была начертана, почему она не прямая? Почему она не ведет прямо от начала к конечной цели? Для муравья (а по правде сказать, и во всех других случаях) мы знаем ответ на этот вопрос. У муравья есть общие ориентиры местоположения его дома, но он не в состоянии предвидеть всех препятствий, которые встретятся ему на пути. Ему снова и снова приходится менять направление, приспособляясь к трудностям, встретив-

шимся на пути, а иногда и возвращаться назад, чтобы обойти непреодолимое препятствие. Его горизонт очень ограничен, поэтому он преодолевает препятствие, лишь когда на него натывается; он пробует обойти его или пройти поверх него, не учитывая того, что его ждет впереди. Поэтому его легко заманить в ловушку.

Рассматривая траекторию движения муравья как геометрическую фигуру, мы убедимся, что она неправильная, запутанная и трудно поддается описанию. Но ее сложность на самом деле отражает лишь сложность рельефа побережья, а не сложность муравья. Другое животное небольших размеров, живущее в том же песке, где и наш муравей, вероятно, изберет примерно такой же путь.

Свыше десяти лет назад Грей Уолтер построил электро-механическую «черепашку», которая умела обследовать поверхность и периодически отыскивала свое «гнездо», где перезаряжались ее батареи. Позднее в нескольких лабораториях, в том числе в лаборатории профессора Минского в Кембридже (штат Массачусетс), создавались автоматы, способные к поиску цели. Предположим, что мы решили создать автомат размером с муравья, имеющий сходные с ним средства передвижения и сравнимые возможности восприятия. Предположим также, что мы снабдили его несколькими простыми механизмами адаптации: если впереди крутой подъем, попытайтесь преодолеть его, карабкаясь не прямо вверх, а наискосок; если перед тобой непреодолимое препятствие, попытайтесь обойти его и т. д. (Если отбросить трудности микроминиатюризации элементов, то на нынешнем уровне знаний такая конструкция вполне реальна.) Чем же будет отличаться поведение подобного автомата от поведения муравья?

Все эти рассуждения приводят нас к гипотезе, к которой можно было бы прийти и на основании соображений, высказанных ранее в отношении искусственных объектов.

В том, что касается принципов своего поведения, муравей весьма прост. Кажущаяся сложность его поведения во времени в основном отражает сложность внешней среды, в которой он функционирует.

С первого взгляда такого рода гипотеза не всем может показаться правдоподобной. Это эмпирическая гипотеза, для проверки которой надо выяснить, можно ли, приписав системе адаптации муравья весьма простые свойства, объяснить его поведение в данной или сходной ситуацион-

Один из подходов к решению этой задачи состоит в том, чтобы перебрать все $10!$ (десять факториал) возможностей замены десяти букв десятью цифрами. Для современной вычислительной машины число $10!$ не столь велико — всего лишь чуть больше 3 миллионов (а точнее, 3 628 800). Программе, предназначенной для систематической проверки всех вариантов и требующей десятой доли секунды на каждую подстановку и проверку, в худшем случае понадобится около десяти часов на всю работу (а при $D = 5$ и вовсе не более четырех часов). И хотя мне не пришлось составлять такую программу, я полагаю, что одна десятая секунды — это гораздо больше того времени, которое действительно потребуется современной машине для проверки одного варианта.

Что же касается человека, то, судя по всему, он едва ли способен на подобный подвиг. Чтобы произвести одну подстановку и проверку, человеку понадобится не менее минуты, и ему очень трудно проследить за тем, что он уже проделал и какие варианты опробованы. Разумеется, для облегчения задания он может воспользоваться карандашом и бумагой, но это лишь затормозит его продвижение вперед. При сорокачасовой рабочей неделе на решение нашей задачи, таким образом, может потребоваться несколько человеко-лет!

Отметим, что наш вывод о невозможности полного систематического перебора как метода решения подобных задач человеком основывался на весьма грубых предположениях о способностях человеческого интеллекта. Мы исходим из предположения, что простые арифметические операции занимают время порядка нескольких секунд, что эти операции выполняются в основном последовательно, а не параллельно и что человек не обладает памятью такого объема, который позволил бы запоминать новые данные за доли секунды. Конечно, все эти предположения говорят кое-что о физиологии нашей центральной нервной системы, но не слишком много. Например, небольшое «усовершенствование» мозга путем добавления в него новой подсистемы, обладающей свойствами обычного арифмометра, ознаменовало бы замечательный успех нейрохирургии — или эволюции. Но даже такая радикальная операция лишь не намного изменила бы наши гипотезы с точки зрения объяснения или предсказания поведения человека при решении такого рода задач.

И все-таки люди сплошь и рядом решают задачи типа $DONALD + GERALD = ROBERT$. Как же они этого добиваются? Каковы иные пути представления внешней среды и поиска решений?

Стратегии поиска

Один из методов резкого сокращения перебора состоит в следующем. Нужно по-прежнему систематически перебирать различные сочетания, но ставить цифры в соответствие буквам таким образом, чтобы негодные варианты обнаруживались как можно раньше, еще до того, как полностью составлена определенная комбинация. Тогда за один прием можно отбросить целый класс возможных цифро-буквенных подстановок. Поясню свою мысль на примере.

Предположим, что мы начинаем справа, последовательно исследуя подстановки для букв $D, T, L, R, A, E, N, B, O$ и G и подставляя цифры в естественном порядке 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 и 0. Мы заранее знаем, что $D = 5$, поэтому среди имеющихся цифр можно вычеркнуть 5. Попробуем T приравнять 1. При взгляде на правый крайний столбец мы сразу замечаем противоречие. Действительно, $D + D = T + c$, где c равно 10 либо 0. А так как при $D = 5$ $T = 1$ невозможно, мы сразу получаем возможность отбросить 8! комбинаций, получающихся в результате подстановки оставшихся восьми цифр вместо восьми букв. Точно таким же путем исключаются все прочие возможные подстановки цифр для T , за исключением $T = 0$. Следовательно, все комбинации, в которых $T \neq 0$, можно не рассматривать.

Описанный подход можно усовершенствовать. Для этого сразу вычисляют (путем сложения), какова должна быть подстановка для суммы, когда известны оба слагаемых. В этом случае нет нужды искать значения для T , так как $T = 0$ можно найти непосредственно, зная, что $D = 5$. Воспользовавшись таким подходом, мы без труда сумеем решить задачу $DONALD + GERALD = ROBERT$ с помощью бумаги и карандаша. Для этого достаточно десяти минут. Дерево поиска для этой задачи в несколько упрощенном виде показано на рис. 3. Каждая его ветвь доводится до точки, позволяющей обнаружить

(поскольку $R = 5 + G$). Объединяя эти два вывода, получаем, что $R = 1$ или $R = 9$, но проверять эти предположения не будем. Вместо этого обратим внимание на то, что у второго столбца слева необычная структура: $O + E = -O$, то есть число плюс некоторое другое число равно самому себе (с точностью до переноса в следующий столбец и переноса из следующего столбца). Знания математики или эксперимент подсказывают нам, что так может быть только в том случае, если $E = 0$ или $E = 9$. Поскольку известно, что $T = 0$, остается лишь возможность $E = 9$, а это в свою очередь устраняет одну из альтернатив для R . Следовательно, $R = 7$.

Из $E = 9$ следует, что $A = 4$ и что в третий столбец справа переносится 1, откуда $2L + 1 = 17$ и, значит, $L = 8$. Нам осталось теперь каким-то образом распределить цифры 1, 2, 3 и 6 между буквами N , B , O и G . Мы полагаем $G = 1$, исходя из того, что, какое бы значение ни приписывалось букве O , в крайний левый столбец происходит перенос. Тем самым осталось всего $3! = 6$ различных возможностей, которые при желании можно перебрать методом проб и ошибок; в итоге получаем $N = 6$, $B = 3$ и, следовательно, $O = 2$.

Итак, мы проследили путь решения нашей задачи, исходя из трех различных предположений о стратегии поиска. При этом выяснилось, что чем совершеннее оказывалась стратегия, тем менее сложным был поиск. Однако важно отметить, что, как только выбрана стратегия поиска, процесс поиска становится связанным лишь со структурой задачи и не зависит от каких-либо характеристик того, кто решает эту задачу. Какой вывод можно было бы сделать относительно познавательной структуры человека или автомата, наблюдая за тем, как он успешно решает задачи подобного рода? Вероятно, нам удалось бы выяснить стратегию, к которой он прибегает. По совершенным им ошибкам и удачному их исправлению мы, возможно, смогли бы выявить не только пределы возможностей системы или точность ее памяти и элементарных процессов, но и в какой-то степени быстроту этих процессов. При благоприятных условиях нам, быть может, удалось бы узнать, к каким из мыслимых стратегий способна прибегать система и при каких условиях она вероятнее всего выберет каждую из них. Но у нас очень мало шансов выяснить что-либо конкретное о нейрофизиологических харак-

теристиках центральной нервной системы решающего задачу человека. К тому же конкретные свойства этой системы едва ли скажутся на ее поведении, если не считать ограничений, которые они накладывают на ее возможности.

Пределы возможностей

Попробуем теперь позитивным образом сформулировать, как мы себе представляем эти ограничения и пределы. При этом будем исходить из экспериментальных данных и опыта машинного моделирования поведения человека. Говоря об экспериментальных данных и моделировании на ЭВМ, мы имеем в виду широкий круг познавательных задач — от достаточно сложных (типа криптоарифметических задач, шахматных задач и задач на доказательство теорем) до задач промежуточной сложности (формирование понятий) и весьма простых задач, которые пользуются наибольшей популярностью в психологических лабораториях (задачи на механическое заучивание текстов, воспринимаемых на слух, или задачи на емкость кратковременной памяти). Несмотря на такое разнообразие задач, при их решении проявляются лишь несколько характеристик пределов приспособляемости внутренней системы. Более того, для всех типов упомянутых задач пределы эти оказываются одними и теми же. Это позволяет надеяться на то, что обнаружение такого рода ограничений даст возможность получить единое логически согласованное объяснение поведения человека для всего многообразия решаемых задач.

Ограничения, налагаемые на быстроту формирования понятий

Проблема формирования понятий широко изучалась психологами в рамках следующего типичного примера¹. Пусть стимулами служит набор карт, на которые нанесены простые геометрические фигуры. Они отличаются друг от друга по форме (на одной карте может быть изображен квадрат, на другой — треугольник, на третьей — круг

¹ Предлагаемое изложение процесса формирования понятий основано на работе «Модели процессов и простые стохастические теории формирования понятий» [12]. См. также [13].

и т. д.), цвету, размеру, положению и т. п. «Понятие» определяется экстенциональным образом, то есть с помощью предъявления некоторого множества карточек, на которых встречается это понятие. Примерами понятий могут служить: «желтое» или «квадрат» (простые понятия), «зеленый треугольник» или «большое и красное» (конъюнктивные понятия), «маленькое или желтое» (дизъюнктивное понятие) и т. д.

Остановимся на экспериментах с N -мерными стимулами, для каждой размерности которых существует всего два возможных значения, и с одномерным формируемым («простым») понятием. На каждом шаге испытуемому предъявляется один пример, положительный или отрицательный, связанный с формируемым понятием. Испытуемый реагирует на него, отвечая «положительный» или «отрицательный», и получает «подкрепление» в виде указания «правильно» или «неправильно» в соответствии с выданным ответом. В типичных опытах подобного рода поведение испытуемого характеризуется числом проб или числом ошибочных ответов до достижения безошибочной реакции на стимулы. В некоторых опытах испытуемого просят также периодически сообщать, какими содержательными понятиями он пользуется (если он к ним прибегает) при выдаче ответов.

Описанная ситуация настолько проста, что, как и в криптоарифметических задачах, мы можем заранее оценить среднее количество испытаний, необходимых для того, чтобы выявить имеющееся в виду понятие (при условии, что испытуемый пользуется наиболее эффективной стратегией поиска). В каждом испытании, независимо от ответа, испытуемый может по реакции экспериментатора (наличие или отсутствие подкрепления) установить, принадлежал ли предъявленный стимул отыскиваемому понятию или нет. Если принадлежал, то испытуемый знает, что один из атрибутов (или признаков) этого стимула — например цвет, размер или форма — входит в определение понятия. Если не принадлежал, то испытуемый знает, что понятие определяется *дополнением* одного из атрибутов стимула. В любом случае в результате каждого испытания исключается половина возможных простых понятий, а в случайной последовательности стимулов каждый новый стимул выбраковывает в среднем половину понятий, оставшихся после предыдущих испытаний. Поэтому среднее

число испытаний, необходимых для выявления искомого понятия, будет пропорционально двоичному логарифму размерности стимулов.

Если на каждое испытание отводится достаточно времени (скажем, одна минута) и если при этом разрешается пользоваться карандашом и бумагой, то любого человека со средними умственными способностями можно обучить наиболее эффективной стратегии поиска, и он будет следовать ей без особых трудностей. Однако, как правило, при проведении описываемых опытов испытуемых не учат эффективным стратегиям, им не дают бумаги и карандаша, а для ответа на каждый последующий стимул им предоставляют очень немного времени — всего порядка четырех секунд. Поэтому, чтобы обнаружить искомое понятие, испытуемым требуется гораздо больше испытаний, чем необходимо при использовании эффективной стратегии. И хотя, насколько мне известно, опыты с обучением эффективной стратегии еще не проводились, я убежден, что даже после обучения человек, которому отводят четыре секунды на ответ и не дают бумаги и карандаша, не сумеет этой эффективной стратегией воспользоваться.

Какой вывод позволяют сделать подобные эксперименты относительно человеческого мышления? Во-первых, они свидетельствуют о том, что люди не всегда способны самостоятельно найти разумные стратегии, хотя их весьма просто обучить этим стратегиям (в этом нас убеждают также наблюдения за игрой мастера-шахматиста с новичком). И хотя это заключение вряд ли следует отнести к числу поразительных, оно весьма поучительно. Но я еще вернусь к этому вопросу.

Во-вторых, как мы имели возможность убедиться, у человека нет достаточных средств для хранения информации в памяти, чтобы он мог пользоваться эффективной стратегией (если только процесс предъявления стимулов не замедляется во много раз или если испытуемым не разрешено пользоваться вспомогательной внешней памятью). Известны факты, свидетельствующие о том, что люди обладают практически неограниченной полупостоянной памятью (на это, в частности, указывает их способность запоминать все новые разрозненные факты на протяжении всей жизни). Поэтому узкое место нашего опыта должно заключаться в малом объеме оперативной (так называемой кратковременной) памяти человека и в величине промежутка

времени, требующегося для перевода единицы информации из ограниченной кратковременной в обширную долговременную память¹.

На основании других опытов мы пришли к следующим выводам: в быстродействующей кратковременной памяти может одновременно храниться не более семи единиц информации (а иногда всего две единицы); на перенос информации из кратковременной памяти в долговременную требуется, по-видимому, не менее пяти секунд. Для того чтобы последние утверждения стали операционными, следовало бы, конечно, уточнить, что имеется в виду под «единицей» информации. Но мы пока предположим, что такой единицей является «простое» понятие.

Можно ожидать, что даже без бумаги и карандаша испытуемый прибегнет к эффективной стратегии, если, во-первых, его такой стратегии обучили и, во-вторых, он располагает в каждом испытании двадцатью-тридцатью секундами на ответ и обработку каждого стимула. Однако лично я подобных опытов не проводил, поэтому предыдущее высказывание следует рассматривать лишь как предсказание, с помощью которого можно проверить справедливость развиваемой ниже теории.

Хочу еще раз подчеркнуть, что сделанные выводы могут показаться читателю очевидными, а возможно и тривиальными. Если это так, то мне хотелось бы напомнить, что очевидными они становятся лишь для тех, кто принимает за истинную мою самую общую гипотезу, гласящую что: *целенаправленное поведение человека в значительной части отражает структуру внешней среды, в которой оно реализуется, и для того, чтобы предсказывать это поведение, нужно лишь самое приближенное знание системы переработки информации человеком.*

В наших опытах такими существенными характеристиками, по-видимому, являются емкость кратковременной памяти, выражаемая числом единиц информации (или «блоков»), и время, необходимое для фиксирования этой единицы информации в долговременной памяти. Ниже я подробнее остановлюсь на том, насколько устойчивы эти

¹ В монографии Брунера, Гуднау и Остина [14], по-видимому, впервые подчеркивалась роль ограниченности кратковременной памяти (авторы пользовались термином «познавательный стресс») в процессах формирования понятий. Там же дается вполне законченное описание некоторых стратегий, выбираемых испытуемыми.

характеристики в отношении широкого круга решаемых задач. Но сейчас мне хотелось бы сделать несколько заключительных замечаний об умении испытуемых пользоваться различными стратегиями и о влиянии обучения.

Вряд ли кого-нибудь удивит утверждение, что тем или иным стратегиям можно обучить. Мало удивительного и в том, что обучение новым стратегиям способно резко изменить качество поведения испытуемого и повысить его эффективность. Все образовательные институты основаны на этих предпосылках. Тем не менее они не всегда в полной мере учитываются психологами, занимающимися изучением процессов познания. В той степени, в какой поведение зависит от навыков, приобретенных в процессе обучения, а не от «врожденных» характеристик системы преобразования информации человеком, наши знания о поведении следует рассматривать как социологические, а не психологические по своей природе. Другими словами, они говорят лишь о том, чему научились люди, развиваясь в определенной социальной среде. Как и когда они этому научились — вопрос другой и очень трудный. Но не следует смешивать стратегии, приобретенные в результате обучения, с врожденными свойствами биологической системы, реализующей эти стратегии.

Эти соображения подтверждают данные Бартлетта и моей лаборатории о поведении людей при решении криптоарифметических задач. В самом деле, для решения этих задач различные испытуемые пользуются различными стратегиями — не только теми, о которых упоминалось выше, но и многими другими. Как они научились этим стратегиям, как пришли к ним, решая поставленную задачу, мы не знаем, хотя известно, что сложность и совершенство используемых стратегий непосредственно зависят от того, насколько испытуемые знакомы с математикой и насколько легко они ее воспринимают. Но, помимо стратегий, единственной характеристикой человека, ярко проявляющейся при решении криптоарифметических задач, является ограниченная емкость его кратковременной памяти. Основные трудности, с которыми сталкивается испытуемый в своих попытках использовать стратегии комбинаторного характера (и, возможно, обычное недоверие к такого рода стратегиям), объясняются теми нагрузками, которым при этом подвергается кратковременная память. Испытуемым трудно просто потому, что они забы-

ность, которая наблюдается в вавилонском смешении языков.

Что же касается второго тезиса, об искусственности языка, то он утверждает, что для различных языков пределы **приспосабливаемости**, налагаемые внутренней средой, являются весьма широкими пределами организации, а не узко специфичными пределами синтаксиса. Более того, эти ограничения касаются не только языковых способностей, но и всех других видов внутреннего представления опыта, приобретаемого с помощью приходящих извне стимулов.

Подобная точка зрения на взаимоотношения языка и мышления проливает новый свет на гипотезу Уорфа, согласно которой (если сформулировать ее в гипертрофированном виде) думать можно только о том, что можно выразить словами. И если эта точка зрения верна, то с тем же успехом можно утверждать, что «выразить можно только мыслимое»!

Заключение

Итак, напомним тезис, с которого мы начали: *человек, рассматриваемый как поведенческая система, весьма прост. Кажущаяся сложность его поведения во времени в основном отражает сложность окружающей его среды.*

Эта гипотеза в свою очередь опиралась на тезис, рассмотренный в первой главе, согласно которому поведение адаптируется к целям, то есть оно искусственно и, следовательно, раскрывает лишь те характеристики изучаемой системы, которые препятствуют полной адаптации.

Чтобы проиллюстрировать, как мы приступили к проверке справедливости этих тезисов и одновременно к созданию теории о простых принципах, лежащих в основе поведения человека, я собрал результаты некоторых опытов, касающихся познавательных возможностей человека, и особенно тех из них, которые проводились в психологических лабораториях.

Поведение людей при решении криптоарифметических задач, при формировании понятий, заучивании наизусть, хранении информации в кратковременной памяти, обработке зрительных стимулов и при выполнении заданий, требующих использования естественного языка, свиде-

тельствует в пользу справедливости рассмотренных тезисов. Искусственность и, следовательно, изменчивость поведения человека вряд ли требуют другого подтверждения, помимо тех, которые дают нам повседневные наблюдения. Поэтому главное значение приводимых примеров в том, что они говорят об общности организации процессов обработки информации у людей, выполняющих различные задания.

Неопровержимо доказано, что система обработки информации человека работает в основном последовательно во времени: она способна перерабатывать одновременно лишь несколько символов, причем обрабатываемые символы должны храниться в особых, ограниченных по емкости, структурах памяти, содержимое которых может быстро меняться. Наиболее резкие ограничения на возможности использования эффективных стратегий накладываются тем обстоятельством, что емкость кратковременной структуры памяти весьма мала (всего семь блоков), а время, необходимое для переноса одного блока информации из кратковременной памяти в долговременную, достаточно велико (порядка пяти секунд).

Когда же мы от задач, связанных в основном с загрузкой кратковременной памяти и с использованием способностей центральной нервной системы к последовательной обработке информации, переходим к задачам, требующим поиска и извлечения хранящейся информации, мы наталкиваемся на новые пределы адаптации и, исследуя эти ограничения, получаем возможность добывать новую информацию об организации мышления и устройстве мозга. Изучение зрительного восприятия и задач, требующих использования естественных языков, все с большей очевидностью свидетельствует о том, что память действительно устроена по ассоциативному принципу, но «ассоциативность» в этом случае обладает такими свойствами, которые специалисты по вычислительной технике называют «списочной» структурой. Выше я вкратце обрисовал характер этих свойств.

Таковы обобщения, относящиеся к законам мышления человека, которые удастся сделать на основании экспериментальных данных. Они весьма просты, чего и следовало ожидать, учитывая исходные гипотезы. Более того, хотя общая картина будет постоянно расширяться и проясняться, не следует ожидать существенного ее усложнения.

Только свойственное человеку высокомерие вынуждает нас считать, что сложность выбираемого нами пути и причудливость траектории движения муравья объясняются различными причинами!

Одно из любопытных следствий избранного мною подхода и выдвинутых тезисов заключается в том, что собственно о физиологии так ничего и не было сказано. Мышление принято связывать с мозгом. Я же говорил об организации мышления, совершенно не затрагивая структуру мозга.

Основная причина такой «десубстанциализации» разума заключается, конечно, в самом рассмотренном выше тезисе. Различие между устройством вычислительной машины и структурой мозга не мешало машинам имитировать широкий спектр процессов человеческого мышления — и все потому, что и машина и мозг в процессе мышления выступают как приспособляющиеся системы, которые стремятся адаптировать свои процессы к задачам, выдвигаемым перед ними окружающей средой.

Я был бы весьма огорчен, если бы, искажая истинный смысл этих выводов, их поняли как утверждение, будто нейрофизиология не может внести свой вклад в объяснение поведения человека. Такая точка зрения по меньшей мере наивна. Вместе с тем наш анализ искусственного вынуждает нас к определенному взгляду на характер возможного физиологического объяснения поведения. Объектом нейрофизиологии являются исследования внутренней среды приспособляющейся системы, известной под названием *Homo sapiens*. Именно к физиологии приходится обращаться за объяснением пределов возможностей приспособления: почему емкость кратковременной памяти ограничена семью блоками? Какова физиологическая структура, соответствующая одному «блоку»? Что происходит в течение пяти секунд, когда осуществляется фиксация одного блока? Как реализуются ассоциативные структуры в мозге человека?

По мере расширения наших знаний взаимосвязь между физиологическим и теоретико-информационным объяснениями станет такой же, как взаимосвязь между квантово-механическими и физиологическими объяснениями в биологии (или между объяснениями на основе физики твердого тела и теории программирования в вычислительной технике). Они образуют два взаимосвязанных уровня объяс-

нения, причем в нашем случае именно на пересечении этих уровней и обнаруживаются предельные возможности системы.

И наконец, последнее замечание. Следует ожидать, что, связывая во внутреннем аспекте психологию обработки информации с физиологией, мы должны будем во внешнем аспекте, то есть с точки зрения задач, предлагаемых внешней средой, связать психологию с общей теорией поиска в больших комбинаторных пространствах. Но это уже тема следующей главы, ибо теория «конструирования» и есть не что иное, как общая теория поиска.