

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ
РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕЙРОИНФОРМАТИКИ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)
ИНСТИТУТ ОПТИКО-НЕЙРОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ РАН

НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ–2007

НЕЙРОИНФОРМАТИКА–2007

**IX ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

**ЛЕКЦИИ
ПО НЕЙРОИНФОРМАТИКЕ
Часть 2**

По материалам Школы-семинара
«Современные проблемы нейронинформатики»

Москва 2007

УДК 001(06)+004.032.26 (06) Нейронные сети
ББК 72я5+32.818я5
М82

НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ–2007. IX ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕЙРОИНФОРМАТИКА–2007»: ЛЕКЦИИ ПО НЕЙРОИНФОРМАТИКЕ. Часть 2. – М.: МИФИ, 2007. – 148 с.

В книге публикуются тексты лекций, прочитанных на Школе-семинаре «Современные проблемы нейроинформатики», проходившей 24–26 января 2007 года в МИФИ в рамках IX Всероссийской конференции «Нейроинформатика–2007».

Материалы лекций связаны с рядом проблем, актуальных для современного этапа развития нейроинформатики, включая ее взаимодействие с другими научно-техническими областями.

Ответственный редактор
Ю. В. Тюменцев, кандидат технических наук

ISBN 5–7262–0708–4 © *Московский инженерно-физический институт
(государственный университет), 2007*

Содержание

<i>В. Я. Сергин.</i> Биологически правдоподобная модель зрительного восприятия: Иерархия объемлющих сенсорных характеристик	77
Введение	78
Объемлющие сенсорные характеристики	84
Формирование объемлющих характеристик	89
Нисходящая стимуляция	98
Мозг обнаруживает сенсорные объекты, а не комбинирует их из признаков	104
Компьютерные эксперименты по распознаванию трехмерных объектов	109
Заключение	115
Литература	117

В. Я. СЕРГИН

Институт математических проблем биологии РАН,
г. Пущино, Московской обл.
E-mail: v.sergin@mtu-net.ru

**БИОЛОГИЧЕСКИ ПРАВДОПОДОБНАЯ МОДЕЛЬ ЗРИТЕЛЬНОГО
ВОСПРИЯТИЯ: ИЕРАРХИЯ ОБЪЕМЛЮЩИХ СЕНСОРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

Аннотация

Вводится понятие объемлющей характеристики, которая является ответом данного перцептивного уровня на те сенсорные признаки нижележащего уровня, специфическое сочетание которых составляет адаптивно значимую целостность. Последовательность объемлющих характеристик образует иерархию, от сенсорных признаков до целостных образов и сцен. Специфические паттерны электрической активности, отображающие объемлющие характеристики, передаются с верхних уровней обработки на нижние, стимулируя те нейронные структуры, сигналы которых соответствуют высшей объемлющей характеристике данного акта восприятия.

V. Ya. SERGIN

Institute of Mathematical Problems of Biology RAS,
Pushchino, the Moscow Region
E-mail: v.sergin@mtu-net.ru

**A BIOLOGICALLY PLAUSIBLE MODEL OF VISUAL PERCEPTION:
THE HIERARCHY OF INCLUSIVE SENSORY CHARACTERISTICS**

Abstract

A concept of inclusive characteristic is introduced which is a response of a given perceptual level to the same sensory features of a lower level whose specific organization constitutes an adaptively meaningful entirety. A sequence of inclusive characteristics forms a hierarchy: from sensory features to unified images and scenes. Specific patterns of electric activity which map inclusive characteristics are relayed by back projections from upper to lower neuronal levels. They stimulate neuronal structures whose signals correspond to the higher inclusive characteristic of a given act of a perception.

Введение

Несмотря на длительную историю изучения восприятия, нейробиологические механизмы его многих важных свойств остаются невыясненными. Например, известно, что данные о цвете, движении, форме и других зрительных качествах окружающего мира обрабатываются в различных зрительных областях коры, количество которых, возможно, достигает нескольких десятков [1]. Перед реальностью этой анатомической разделенности обработки сенсорных сигналов требует объяснения способность психики людей и животных к целостному восприятию окружающего мира. Эта проблема известна в психологии и нейробиологии как «проблема связывания». Вопрос состоит в том, как и посредством каких механизмов мозг связывает сенсорные признаки в целостные образы и сцены?

Другое фундаментальное свойство восприятия, требующее объяснения, известно как инвариантность восприятия. Например, мы воспринимаем летящую птицу как ту же самую, хотя ее геометрическая форма и характеристики светового потока, падающего на сетчатку глаз, кардинально изменяются. Почему мы воспринимаем объект как тот же самый, даже если его форма, размеры, экспозиция, освещенность, положение в поле зрения и другие физические характеристики изменяются?

Известно, что обучение восприятию сенсорных категорий связано с формированием автоматизмов или условных рефлексов, что требует достаточной тренировки. Однако, во многих случаях, обучение восприятию новых сенсорных категорий у человека и высших млекопитающих происходит очень быстро, буквально с первого предъявления. Как может происходить столь быстрое обучение, если оно основано на выработке автоматизмов или условных рефлексов?

Миллиарды фотонов падают на сетчатку глаз, образуя бесконечные комбинации сенсорных сигналов, которые кодируются электрической активностью нейронов и передаются в вышестоящие структуры мозга. Огромная избыточность первичных сенсорных сигналов, идущих от рецепторов, могла бы быстро переполнить память, что сделало бы восприятие невозможным. Поэтому мозг, как кажется, должен фильтровать избыточную информацию, чтобы обеспечить выделение значимых сигналов. Такая проблема хорошо известна в нейробиологии и, начиная со времен *К. Прибрама* [2], возникла обширная научная литература, где исследуется множество весьма изощренных методов, которые, как предполагается, использует мозг для подавления и фильтрации избыточной информации. В свете этих изыска-

ний деятельность мозга выглядит интригующе: мозг принимает устрашающе избыточную информацию, а затем борется с ней всеми доступными средствами.

Согласно воззрениям недавнего прошлого, сенсорные данные образуют восходящий поток от рецепторов к ассоциативной коре. Эти данные интегрируются, образуя в коре головного мозга внутреннюю репрезентацию сенсорного объекта [3]. Если это действительно так, то должна существовать нейронная структура, пусть даже весьма обширная, куда стекаются все сенсорные данные, — некий «познающий гомункулус». Но такой нейронной структуры не обнаружено и от «гомункулуса» пришлось отказаться. Однако взамен не было предложено ничего, обладающего сколько-нибудь эквивалентными объяснительными возможностями. Как пишут *G. Chose* и *J. Maunsell* [4], «... нам по-прежнему не хватает обоснованной механистической структуры для объяснения того, как паттерны нейронной активности трансформируются в восприятие и поведение». Поэтому, несмотря на официальное отречение, «гомункулус» продолжает неявно присутствовать во многих современных теориях восприятия.

Известна давняя проблема, которая до сих пор остается открытой: каким образом материальная, объективно регистрируемая нейронная активность мозга порождает идеальный субъективный образ? Единственным непосредственным источником наших ощущений может быть только активность нейронных структур. Однако мы воспринимаем окружающий мир не в характеристиках нейронной активности, а в категориях внешних событий. Нейронную активность мы не ощущаем вообще. Таким образом, давний вопрос состоит в следующем: как субъективное восприятие сенсорных событий связано с нейронной активностью мозга?

Существует и множество других пока еще не решенных проблем восприятия. В настоящее время их экспериментальное изучение ведется совершенно новыми, беспрецедентно эффективными техническими средствами, которые, похоже, превосходят наши возможности создавать концепции, обеспечивающие понимание экспериментальных данных. Можно указать три основные идеи, которые доминируют в современных исследованиях организации и функционирования системы восприятия. Наиболее продвинутой выглядит концепция иерархической организации восприятия. В иерархических моделях сенсорная информация проходит последовательные стадии обработки, начиная от выделения простых признаков, которые затем интегрируются на более высоких уровнях и формируют отображения все более сложных объектов и событий окружающего мира. *Хьюбел* и *Визел*

[5] предложили модель иерархии зрительных областей коры, составленных из различных клеток, от простых до более сложных и гиперсложных. Общая черта всех иерархических моделей — последовательная обработка в восходящих сенсорных путях и формирование отображений возрастающей сложности.

Иерархические модели опираются на данные анатомии и физиологии головного мозга и подтверждаются экспериментальными данными психофизики восприятия. Тем не менее, в рамках этих моделей существует проблема «комбинаторного взрыва» (экспоненциального роста числа нейронов, необходимых для отображения объекта, при увеличении числа его признаков), проблемы сегментации зрительного поля и инвариантного распознавания объектов [6, 7]. Кроме того, возникают трудности распознавания объектов с ранее не встречавшимися сочетаниями признаков — «проблема новизны» [8, 9].

Массированные обратные связи из ассоциативных областей коры в проекционные области и подкорковые структуры мозга служат анатомической основой концепции управления восприятием сверху вниз. Предполагается, что нисходящий процесс облегчает обнаружение объекта, существенно сокращая число отображений, подлежащих распознаванию. Исследования последних лет постепенно выдвигают нисходящее облегчение в число интенсивно изучаемых корковых функций, но как такая обработка инициируется — остается загадкой [10]. Не известны ни место встречи, ни способ взаимодействия нисходящей стимуляции и восходящего сенсорного возбуждения. Неопределенность усугубляется еще и тем обстоятельством, что меры специфичности/абстрактности у восходящего и нисходящего потоков совершенно различны [6, 11]. Отсутствуют прямые доказательства причинной связи активности префронтальной коры и модулирующей активности в сенсорных областях мозга [12]. Серьезные сомнения в роли стимуляции сверху связаны также с тем, что распознавание объекта в сложных зрительных сценах происходит приблизительно за 150 мс [13]. Это соизмеримо со временем передачи сигнала из сетчатки в инферотемпоральную кору, которая играет ключевую роль в распознавании объектов [14]. Времени для отбора объекта, посредством нисходящей стимуляции, как будто бы просто не остается.

Von der Malsburg [15] постулировал специальный механизм связывания — синхронную колебательную активность ансамбля нейронов, которая связывает вместе признаки одного объекта. Предполагается, что модуляция нейронной активности частотой 30–70 Гц синхронизирует генерацию спай-

ков нейронами, представляющими элементы одного объекта [16]. Различные частоты или фазы модуляции могут использоваться для одновременной маркировки разных объектов. В рамках этого подхода можно динамически и селективно связать нейроны, распределенные по зрительной коре или принадлежащие разным сенсорным и моторным системам [17].

Гипотеза синхронизации основана на множестве нейрофизиологических исследований, которые показывают, что нейроны, активируемые общим стимулом, обычно генерируют синхронно [17, 18]. Эта синхронизация наблюдается между нейронами в разных зрительных областях, между зонами в разных полушариях головного мозга, а также между сенсорными и моторными областями [16, 19].

Однако возможности гипотезы синхронизации оказываются все же ограниченными. Она не объясняет, как специфическая группа нейронов сегментируется от других активных нейронов, как достигается синхрония и как она формирует унитарное восприятие, решения или действия [4]. Поскольку нейроны кодируют изменения стимула с точностью в несколько миллисекунд, то информация о быстрых изменениях будет потеряна, если сигналы будут модулироваться частотой ниже 100 Гц, как должно быть в соответствии с гипотезой синхронизации. Серьезную проблему для гипотезы синхронизации представляют временные различия ответов нейронов зрительной коры. Нейроны с быстрыми ответами могут прекратить свою активность прежде, чем другие нейроны начнут интенсивно отвечать [20]. Для кратковременных стимулов ответы нейронов в зоне V1 могут завершиться раньше, чем высшие уровни зрительной коры получают необходимые сигналы [21].

Несмотря на проблемы, возникающие в рамках упомянутых концепций восприятия, следует иметь в виду, что каждая из них базируется на внушительном фундаменте экспериментальных данных анатомии и физиологии головного мозга человека и высших млекопитающих. Нейрофизиологические механизмы, представленные в этих исследованиях, хорошо аргументированы, поэтому вполне естественно выглядят попытки объединить их в одной концепции [22, 23]. Такие исследования обнаруживают новые аспекты организации восприятия и дают более глубокое понимание нейробиологических механизмов. Но все же сомнительно, чтобы простое объединение разных моделей привело к органически целостной концепции, лишенной недостатков составляющих частей. Нам представляется, что необходим новый подход, основанный на нейробиологических данных, из которого могли бы следовать ключевые механизмы современных концепций восприятия

в такой взаимной связи, которая порождает функционально целостную систему.

Заметим, что способность системы восприятия отображать сенсорные признаки окружающего мира, такие как линии, границы, пятна, цвет, движение и т. д., является нейробиологическим фактом. Способность человека воспринимать объекты, образы и сцены также является фактом. В отличие от этих утверждений, способность системы восприятия связывать сенсорные признаки в образы и сцены является областью теоретических предположений. Идея о том, что образ является результатом связывания признаков кажется вполне очевидной и не вызывает сомнений у большинства исследователей. Тем не менее, нет никаких нейробиологических данных, доказывающих, что связывание признаков в объекты действительно существует.

В основе предлагаемой гипотезы восприятия лежит фундаментальный нейробиологический факт: размеры рецептивных полей нейронов увеличиваются от проекционной коры вверх по сенсорному пути [24]. Поэтому нейронные структуры вышележащих уровней обработки не могут отображать деталей стимульного поля, которые имеются на нижележащих уровнях и требуют высокого пространственного разрешения. Однако, нейронная структура каждого последующего уровня обработки может формировать собственную характеристику, объемлющую данные нижележащего уровня и выражающую адаптивно значимую целостность. Требования к точности отображения целого ниже, чем требования к точности отображения деталей. Поэтому формирование иерархии объемлющих характеристик хорошо согласуется с тем фактом, что размеры рецептивных полей нейронов растут от проекционных к ассоциативным областям.

Другой фундаментальный нейробиологический факт состоит в том, что система восприятия извлекает из сенсорного возбуждения дифференциальные признаки. Дифференциация обеспечивает формирование многомерно пространства признаков, соответствующих каждому акту восприятия. Дифференциация в разных аспектах обнаруживает специфичность актуального стимульного поля и, в сущности, является средством многоуровневого отображения специфичности.

Специфические сочетания признаков соответствуют значимым целостностям различных уровней обработки. Система восприятия выявляет специфичность стимульного поля, посредством дифференциации сенсорного возбуждения на последовательных уровнях обработки, и порождает иерархию характеристик, объемлющих специфические сочетания признаков. Си-

стема восприятия не комбинирует и не интегрирует сенсорные данные, а обнаруживает такие специфические сочетания признаков, которые соответствуют значимым объектам или событиям.

В этой гипотезе иерархическая организация восприятия естественным образом вытекает из определения объемлющей характеристики. Ни на одном уровне обработки не происходит ни комбинирования, ни интегрирования признаков. Поэтому проблемы комбинаторного взрыва просто не существует, а другие проблемы иерархических моделей имеют ясные перспективы решения [25]. В такой модели нисходящая стимуляция должна, по необходимости, соответствовать иерархии объемлющих характеристик. Предполагается, что стимуляция сверху уменьшает время реакции отобранных нейронов нижележащих уровней до миллисекундного диапазона. В результате нейронные популяции нижележащих уровней, участвующие в данном акте восприятия, становятся детекторами совпадений и синхронно отвечают на одновременно приходящие спайки. В этом и состоит взаимодействие нисходящей стимуляции с восходящим сенсорным возбуждением. Иерархически упорядоченный набор нейронных ансамблей из детекторов совпадений формирует быстрый сенсорный путь, единственный и уникальный для каждого акта восприятия.

Таким образом, давно соперничающие теории иерархической организации, синхронизации нейронной активности и управления восприятием сверху вниз оказываются естественным образом связанными в единой концепции восприятия. Выполненные исследования показывают, что в модели объемлющих характеристик удачно сочетаются достоинства этих теоретических воззрений на природу восприятия и, возможно, отсутствуют их недостатки [26, 27, 28]

К этому следует добавить, что гипотеза объемлющих характеристик хорошо согласуется с принципом доминанты А.А. Ухтомского [29], который был положен в основу обширного цикла исследований внимания [30, 31, 32, 33]. Хотя представленная в данной работе модель восприятия не является осцилляторной, из дальнейшего изложения станет ясным, что она вполне совместима с представлениями о доминирующей констелляции совозбужденных локальных нейронных групп или центров, характеризующихся единым ритмом и единым действием.

Объемлющие сенсорные характеристики

Известно, что сетчатка глаза проецируется в первичную кору с высокой топографической точностью и нейроны проекционной коры имеют минимальные рецептивные поля. При движении вверх по зрительному пути рецептивные поля нейронов увеличиваются, а точность топографического отображения падает [24]. Это правило справедливо для всей сенсорной коры: размеры рецептивных полей нейронов растут от проекционных к ассоциативным областям. Поэтому нейронные структуры вышележащих уровней обработки не могут отображать деталей стимульного поля, которые имеются на нижележащих уровнях и требуют высокого пространственного разрешения. Но тогда, что именно могут отображать нейронные структуры вышележащих уровней?

Мы полагаем, что нейронная структура каждого последующего уровня обработки может порождать собственную характеристику, объемлющую данные нижележащего уровня в некотором адаптивно важном аспекте. Объемлющая характеристика может выражать некоторую целостность, обладающую качественной специфичностью на более высоком уровне. Например, наборы линий образуют решетку, последовательность звуков — ритм, глаза и нос — лицо и т. п. Требования к точности отображения целого ниже, чем требования к точности отображения деталей. Поэтому формирование иерархии объемлющих характеристик хорошо согласуется с тем фактом, что размеры рецептивных полей нейронов растут от проекционных к ассоциативным областям.

Объемлющая характеристика — это перцептивная гипотеза о том, что данное специфическое сочетание признаков соответствует определенному объекту или событию. Если идентификация объекта или сенсорного события дает организму новые адаптивные преимущества, то характеристика, объемлющая соответствующие им признаки, может быть построена в процессе обучения.

Витальная ценность отдельных признаков стимула состоит в том, что организм может реагировать на те из них, которые биологически значимы. Но отдельные признаки порознь могут оказаться незначимыми сами по себе и только специфическое сочетание признаков приобретает биологический смысл. Связывание признаков, относящихся к одному объекту, требует их синхронного отображения [16, 18]. Однако это необходимое условие связывания не является достаточным условием целостного восприятия. Целостное восприятие требует формирования объемлющей характеристики,

обладающей качественной специфичностью на более высоком когнитивном уровне. Объемлющая характеристика обеспечивает организму новые возможности, недостижимые средствами подчиненных уровней когнитивной иерархии.

Объемлющая характеристика выражает специфическое сочетание признаков объекта или события, которое, в определенных обстоятельствах, оказалось адаптивно значимым для данного организма. Повторение этого сочетания признаков, при сходных обстоятельствах, ведет к повторению адаптивного поведения. Если объемлющая характеристика подкрепляется, обеспечивая организму новые адаптивные преимущества, реакция сенсорной системы фиксируется в качестве автоматизма или условного рефлекса. Возникновение условного рефлекса означает формирование специализированной нейронной структуры, порождающей эту реакцию, и замыкание связей «стимул–реакция». Чем выше адаптивная (биологическая или социальная) ценность объекта и чем сильнее потребность организма в этом объекте, тем быстрее формируется в процессе обучения специализированная нейронная структура, порождающая его объемлющую характеристику. В результате этот объект может выделяться и избирательно восприниматься среди множества других объектов.

Объемлющая характеристика является ответом данного перцептивного уровня на специфическое сочетание признаков, выделенных из множества других посредством обучения. Из множества признаков нижележащего уровня отбираются только те, пространственная организация или специфическая временная последовательность которых составляет значимую целостность. Например, из множества отрезков разных размеров и ориентаций, расположенных на плоскости, отбираются те, которые образуют треугольники, квадраты или другие геометрические фигуры. При восприятии речи из множества звуков и шумов отбираются только специфические звуки человеческой речи, которые образуют слоги, слова и фразы — адаптивно значимые целостности.

Формирование объемлющей характеристики иллюстрируется схемой на рис. 1. Нейронная структура, сформированная посредством обучения, отвечает на специфическое сочетание признаков, выражающее значимую целостность. Тем самым, из большого разнообразия признаков, которые отображаются нижележащим уровнем, отбираются только адаптивно значимые сочетания. Выходной паттерн электрической активности специализированной нейронной структуры — паттерн категоризации — отображает значимую целостность данного уровня обработки.



Рис. 1. Пример формирования объемлющей характеристики в психологических (а) и нейрофизиологических (б) терминах

Следует подчеркнуть отличие объемлющей характеристики от интегральной. Интегрирование, в своей сущности, является процессом суммирования (определяемое как предел аппроксимирующей суммы фрагментов при их неограниченном измельчении). Интегральная форма представления — это представление суммарных данных. Интегральные характеристики (виды интегралов и процедуры их вычисления) формально определены, что обеспечивает объективное представление данных, на которые не влияет биологическая специфичность.

Объемлющая характеристика выражает такое специфическое сочетание признаков, которое образует новое сенсорное качество — адаптивно значимую целостность. На каждом уровне обработки, из большого разнообразия признаков и сочетаний нижележащего уровня, отбираются только значимые целостности. Отбор признаков и их специфических сочетаний изначально субъективны и определяются эволюционным опытом и прижизненным обучением организма. Объемлющие характеристики биологически специфичны и субъективно избирательны.

В модели объемлющих характеристик нейронная организация обра-

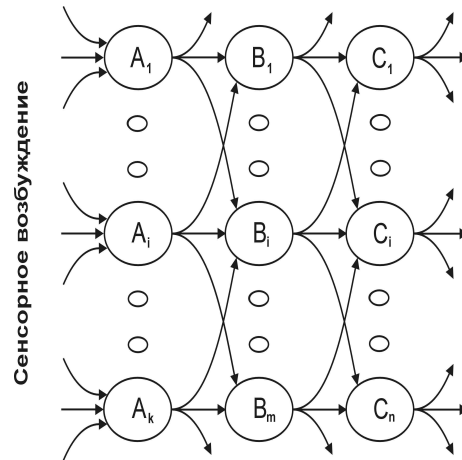


Рис. 2. Схема передачи возбуждения по одному из сенсорных путей. Овалами показаны нейронные популяции (A_i, B_i, C_i), которые образуют нейронные структуры последовательных уровней обработки A, B и C . Большими овалами отмечены те популяции, которые отвечают на данный стимул и составляют нейронные ансамбли данного акта восприятия. Связи между популяциями одного уровня не показаны, чтобы не усложнять схему.

ботки (рис. 2) может соответствовать принципам Д. Хебба [34], согласно которым совокупность популяций нейронов одного уровня обработки, отвечающих на отдельный стимул, составляет нейронный ансамбль. Одни и те же популяции нейронов, в разных актах восприятия, могут входить в состав различных ансамблей. Ответ нейронного ансамбля физиологически выражается паттерном электрической активности, специфичность которого отображает определенную сенсорную характеристику (например, движение в определенном направлении). Нейронные ансамбли различных уровней обработки функционально специализированы и их ответы отображают различные сенсорные качества стимула. Любой отдельный стимул вызывает ответ множества нейронных ансамблей различных уровней обработки.

Все популяции одного уровня обработки, имеющие одинаковую функциональную специализацию (например, отвечающие на движение), обра-

зуют нейронную структуру. Специализированная нейронная структура порождает паттерны электрической активности различных специфичностей, которые отображают различные характеристики данного сенсорного качества (например, движение в разных направлениях).

В модели объемлющих сенсорных характеристик нейронные уровни обработки совпадают с уровнями восприятия, но не совпадают со специализированными областями коры, которые могут содержать больше одного уровня. Объемлющая характеристика выражает некоторую значимую целостность и отображается специфическим паттерном электрической активности нейронной структуры, обученной распознавать этот сенсорный объект. Таким образом, психическая характеристика (значимая целостность) имеет материальный носитель (специфический паттерн электрической активности) и именно поэтому может оказывать влияние на другие психические и физиологические процессы. Психическое и физиологическое — разные выражения одной и той же реальности (две стороны одного процесса), поэтому они существуют и протекают одновременно [35, 36].

Сенсорная характеристика является объемлющей в той мере, в какой она обладает качественной специфичностью, отличающей ее от компонент, по отношению к которым она является характеристикой более высокого уровня. Объемлющую характеристику нельзя разложить на компоненты и свести к ним, поскольку при этом будут разрушены те отношения между компонентами, которые порождают значимую целостность, определяющую качественную специфичность объемлющей характеристики.

Целостность предполагает относительную обособленность объекта: влияние не входящих в него окружающих признаков не должно изменять качественной специфичности объекта. Целостность и качественная специфичность объекта порождаются не сходством частей и не их физической связанностью, а адаптивным смыслом данного сочетания для воспринимающего субъекта. Например, сцена может включать разнородные части, не имеющие устойчивых связей, тем не менее, адаптивный смысл ситуации порождает целостность и качественную специфичность сцены.

Компоненты не определяют целостность. Например, если отрезки, образующие решетку, заменить дугами, все равно это будет решетка. Даже если отрезки заменить произвольными узорами, качественная специфичность решетки сохранится: сквозь нее можно видеть, но нельзя проникнуть. Объемлющая характеристика существует и выражает значимую целостность лишь в той мере, в какой существуют специфические отношения компонент. Специфичность этих отношений определяет качественно иную

сущность, обладающую собственными свойствами, отличными от свойств ее компонент. Например, решетка обладает такими свойствами как плотность, узор, длина, высота и т. д., которые нельзя получить из свойств ее компонент — прямолинейных или криволинейных отрезков.

Сенсорная характеристика, объемлющая данное специфическое сочетание признаков, должна быть единственной. В противном случае восприятие может порождать замешательство, препятствующее адекватной моторной реакции организма. Единственность объемлющей характеристики является условием ее адаптивной ценности.

Теперь можно сформулировать необходимые и достаточные условия существования объемлющей характеристики. Объемлющая характеристика существует тогда и только тогда, когда: 1) имеют место такие отношения компонент, которые порождают адаптивно значимую целостность, обладающую качественной специфичностью, отличающей ее от компонент; 2) эта значимая целостность единственна в данном акте восприятия.

Мы полагаем, что нейронная структура, соответствующая любому уровню восприятия, порождает характеристику, объемлющую те данные нижележащего уровня, специфическое сочетание которых составляет адаптивно значимую целостность. Сенсорное событие, не порождающее объемлющей характеристики, не может восприниматься как осмысленное целое. Только отобранные признаки и их объемлющие характеристики являются сенсорными данными. Сенсорные системы не воспринимают и не передают в вышестоящие структуры мозга никакой другой информации [26, 27].

Формирование объемлющих характеристик

Если некоторая часть зрительного поля содержит один и тот же признак (например, зеленый цвет или штриховку), то первичная объемлющая характеристика может определять просто конфигурацию пространства, занятого этим признаком. Функциональная роль первичных объемлющих характеристик может состоять в отображении конфигурации однородных областей зрительной сцены. Тогда представление зрительного поля несколькими первичными объемлющими характеристиками должно порождать хорошо выраженную разделенность поля на области. Действительно, как показывают экспериментальные данные, если участки текстуры отличаются ориентацией, пространственной частотой, размером или цветом своих элементов, то эти различия ведут к мгновенной сегментации текстуры, не

требующей внимания [37, 38]. Участок текстуры, имеющий один общий признак, автоматически отделяется от другого участка текстуры, имеющего другой общий признак [39].

Функциональная роль первичных объемлющих характеристик позволяет объяснить одно важное свойство зрительного восприятия. Известно, что если область вокруг слепого пятна однообразно и равномерно занимает, например, серия линий, то мозг заполняет пропущенное пространство подобными линиями, которые совпадают с реальными линиями [40]. Механизм заполнения, в таких случаях, может состоять в формировании первичной объемлющей характеристики, определяющей конфигурацию пространства, занятого данным признаком.

Границы между однородными областями также представляют собой первичные объемлющие характеристики. Первичные объемлющие характеристики — поверхности и границы — участвуют в формировании объемлющих характеристик более высокого уровня, отображающих объекты окружающего мира.

Проекционная кора V1 отображает локальные признаки объектов. Эти признаки доступны для обработки нейронным структурам области V2. Рецептивные поля специализированных нейронов области V2, отвечающих на определенное сенсорное качество, например, длину световой волны или ориентацию линий, образуют непрерывную топографическую карту сетчатки глаза [24]. Область V2, вероятно, включает набор нейронных структур, обеспечивающих отображение признаков всех субмодальностей во всем зрительном поле. Но рецептивные поля нейронов области V2 значительно больше, чем у нейронов проекционной коры, поэтому здесь могут отображаться характеристики, объемлющие локальные признаки. Мы полагаем, что формирование первичных объемлющих характеристик может быть одной из функций нейронных структур области V2.

Известно, что нейроны проекционной коры V1, избирательно реагирующие на элементы формы, не реагируют на иллюзорные контуры или отсутствующие отрезки линий. Нейроны зрительной области V2 получают сенсорное возбуждение от нейронов области V1 и, тем не менее, они реагируют на иллюзорные контуры, как бы «подразумеваемая» недостающие отрезки линий [24]. Если функциональная специализация области V2 состоит в формировании первичных объемлющих характеристик, то она может отображать контуры и простейшие формы. Специализация нейронной структуры происходит в процессе обучения, поэтому порождение объемлющей характеристики после обучения не требует полной входной ин-

формации. Тогда нейронная структура зрительной области V2, в ответ на сенсорное возбуждение, может порождать перцептивную гипотезу, например, геометрическую фигуру, даже если часть ее контура или некоторые отрезки линий отсутствуют. Поэтому от нейронных структур области V2 не требуется никаких аналитических способностей, чтобы заполнять пустые места или достраивать недостающие линии.

Известно, что разрушение специализированных зрительных областей коры ведет к полной и специфической утрате способностей воспринимать соответствующие сенсорные качества. Например, разрушение области V4 ведет к ахроматопсии, а разрушение области V5 — к акинетопсии. На этом фоне кажется удивительным отсутствие полной и специфической утраты способности видеть форму в случаях разрушения престриарной коры [24]. Разрушение престриарной коры, не затрагивающее область V1, предполагает хотя бы частичное сохранение области V2, которая тесно прилегает к области V1. Если объемлющие характеристики, которые формируются зрительной областью V2, действительно отображают простейшие формы, то способность видеть форму может не утрачиваться полностью даже при разрушении зрительных областей V3 и V4, специализация которых связана с восприятием формы объектов.

Каким образом в зрительном поле, разделенном на области по простым признакам, выявляются объекты? Связанные с объектом признаки появляются одновременно, изменяются синхронно и исчезают также одновременно. Одновременное отображение комбинации признаков, локализованных в одном месте, делает возможным построение объемлющей характеристики объекта, выражающей его качественную специфичность. Экспериментально установлено, что пространственно распределенные элементы изображения объекта в самом деле связываются перцептивно и интерпретируются как один объект, если они появляются одновременно или изменяются синхронно [41].

Однородные части зрительного поля составляют компоненты фона, которые характеризуются определенной конфигурацией и взаимным расположением. Фон и объекты составляют сцену, качественная специфичность которой может быть выражена объемлющей характеристикой более высокого уровня.

Компоненты фона — это квазиобъекты, конфигурация и взаимное расположение которых выражаются первичными объемлющими характеристиками. Некоторые из этих квазиобъектов могут оказаться объектами, если характеризующие их комбинации признаков будут идентифицированы как

обладающие соответствующей качественной специфичностью. Тогда предварительная локализация объекта — это унаследованное пространственное положение данного квазиобъекта по отношению к другим квазиобъектам. Формирование объемлющей характеристики объекта ведет к уточнению его пространственного положения. Выделение объектов из сенсорного фона делает возможным формирование объемлющей характеристики более высокого уровня - сцены. Восприятие объекта в контексте сцены завершает его пространственную локализацию.

Из нашей схемы следует, что идентификация объекта и определение его местоположения являются связанными итерационными процессами. Следовательно, дорсальный париетальный путь должен итерационно взаимодействовать с вентральным путём. Объекты имеют различное положение на фронтальной плоскости и по глубине, поэтому, вопреки представлениям *Roelfsema et. al* [42], не должно возникать никакой неопределенности при появлении в поле зрения двух и более объектов. Однако могут возникать трудности идентификации в тех случаях, когда один объект частично маскируется другими объектами. К этой проблеме мы еще вернемся.

Идентификация сенсорных признаков, таких как пятна, линии, углы, их размещение, ориентация, движение и цвет, требует поточечного анализа всего поля зрения и, следовательно, требует высокого пространственного разрешения, большой вычислительной мощности и большого объема памяти. Формирование характеристик, объемлющих идентифицированные признаки, не требует столь высокого пространственного разрешения или большой вычислительной мощности. Например, сочетания отрезков, образующих решетку, крест или треугольник, можно обнаружить по специфическим отношениям между отрезками, что не требует поточечного анализа поля зрения. Идентификация образов может состоять в выявлении специфических отношений сенсорных объектов ниже лежащего уровня (например, определенное расположение глаз, носа и губ могут порождать образ лица).

Чем выше когнитивный уровень объемлющей характеристики предмета или события, тем она может быть проще и схематичнее по отношению к исходному набору признаков. Это позволяет увеличивать количество специфических сочетаний признаков, объемлемых характеристикой более высокого уровня, при неизменной скорости обработки. Следовательно, может возрастать широта охвата сенсорных качеств окружающего мира, увеличиваться разнообразие объемлющих характеристик, их специфичность и уникальность. Благодаря такой организации восприятия возможно практи-

чески безграничное разнообразие уникальных сенсорных объектов, которые мы способны распознавать.

Формирование объемлющей характеристики в процессе обучения — это индуктивный процесс установления значимой целостности, которая проявляется специфическими сочетаниями признаков во многих ситуациях. Обучение должно включать выявление значимых сочетаний признаков и игнорирование всех остальных данных нижележащего уровня. Тогда иерархию объемлющих характеристик можно рассматривать как продукт последовательных этапов абстрагирования. Объемлющая характеристика каждого последующего уровня выражает более абстрактные свойства стимула, присущие ему как целому, и представляет его в схематической или символической форме. Вопреки традиционным представлениям об иерархической организации восприятия как последовательности от простого к сложному, иерархия объемлющих характеристик является последовательностью от сложного к простому.

Иерархия объемлющих характеристик — это путь от восприятия физических к формированию семантических характеристик (рис. 3). Каждый следующий перцептивный уровень порождает характеристику, объемлющую более широкий спектр свойств окружающего мира, и формирует новое сенсорное качество, имеющее более сложный и опосредованный адаптивный смысл. Чем выше уровень в системе восприятия, тем меньше физических подробностей содержит соответствующая объемлющая характеристика и тем более уникальные семантические черты окружающего мира она выражает. Высшая объемлющая характеристика выражает ключевые черты целостного образа, его схему, концепцию.

Важно заметить, что высшая объемлющая характеристика, — это не образ и не сцена, а уникальная схема сочетания объектов нижележащего уровня, порождающая образ или сцену. Стимульное поле может отображаться набором вложенных сенсорных характеристик, что обеспечивает детальность (за счет нижних уровней) и целостность отображения (за счет верхних уровней). Вложенность означает последовательность все более объемлющих отображений, что обеспечивает глобальную упорядоченность сенсорных структур.

На каждом уровне восприятия отбираются только значимые целостности из данных нижележащего уровня. Поэтому в модели объемлющих характеристик не существует тотального потока данных, которые последовательно передаются с нижних уровней восприятия вверх по сенсорному пути. Сенсорные данные остаются на том уровне восприятия, где они бы-

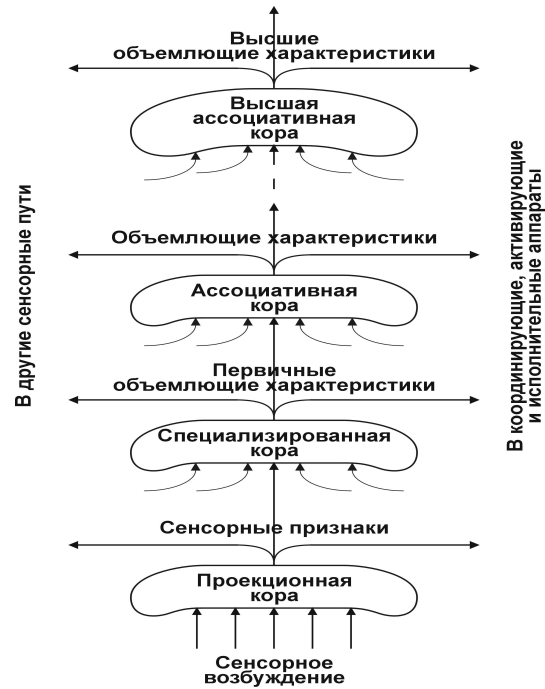


Рис. 3. Функциональная схема одного из восходящих сенсорных путей. Стрелки снизу вверх указывают на поток сенсорных данных, а последовательность формирования объемлющих характеристик. Тонкие стрелки показывают входы от других нейронных структур.

ли идентифицированы. Сенсорные данные никуда не стекаются и нигде не отображаются в интегральной форме. В такой модели разместить всезнающий гомункулус просто негде.

Чем выше уровень в системе восприятия, тем меньше объем выборки. На высшем уровне, в каждом акте восприятия, существует только одна характеристика, объемлющая данные нижележащего уровня в значимую целостность — образ или сцену (рис. 4). Поэтому в модели объемлющих характеристик комбинаторный взрыв невозможен, как его нет и в реальном восприятии. Объемлющие характеристики являются альтернативой доминирующим в науках о мозге представлениям об интегральных характери-

стиках и интегральных образах. Аппарат интегрирования — техническое средство математического и компьютерного моделирования — приобрел в науках о мозге неадекватный концептуальный статус.

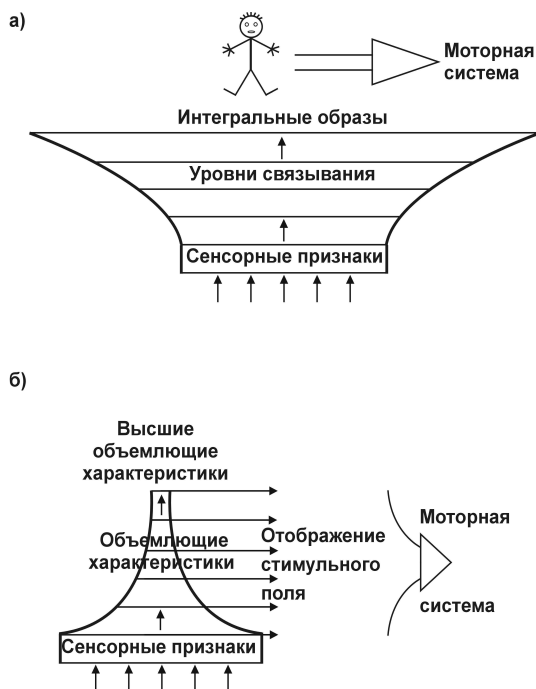


Рис. 4. Зависимость возможного числа сенсорных объектов от уровня обработки в модели связывания признаков (а) и в модели объемлющих характеристик (б)

Интегральных образов восприятия, включающих все сенсорные данные, от признаков до сцен, не существует. Хотя нам кажется, что мы видим все и сразу, ни в какой области мозга интегральных образов нет. Модель объемлющих характеристик позволяет понять те свойства восприятия, которые порождают ощущение, будто окружающий мир доступен нашему зору в целом и во всех подробностях одновременно.

Зрительное поле отображается параллельным набором вложенных сенсорных характеристик (рис.4), что обеспечивает детальность и целост-

ность отображения. Восприятие может фокусироваться на отдельных объектах или их фрагментах, что автоматически сопровождается высоким пространственным разрешением, или охватывать всю сцену целиком, но лишь в общих чертах (вследствие схематичности высших объемлющих характеристик). Изменение пространственного масштаба и детальности видения происходят так же автоматически, как перенос взора, и не требуют волевых усилий.

Любая сенсорная характеристика восприятия неразрывно связана с другими сенсорными данными объемлющей характеристикой более высокого уровня. Это может порождать органически встроенное и подвижное отображение сенсорных событий различного когнитивного уровня и пространственного масштаба в их неразрывном единстве. Иерархически упорядоченная последовательность вложенных сенсорных характеристик, позволяет нам произвольно рассматривать детали видимой сцены, отдельные объекты или всю сцену целиком и обеспечивает незаметный и плавный переход от одного к другому. В результате мы видим окружающий мир, как того пожелаем: в целом или во всем разнообразии его подробностей, что порождает ощущение, будто он весь и сразу представлен нашему взору.

«Проблема новизны» в иерархических моделях возникает из-за трудностей распознавания сенсорных объектов с ранее не встречавшимися сочетаниями признаков. Эти трудности, казалось бы, можно преодолеть посредством обучения. Но тогда возникает вопрос: если восприятие сенсорных категорий связано с обучением (выработкой автоматизмов или условных рефлексов), то как объяснить, что во многих случаях восприятие новых категорий человеком и высшими млекопитающими происходит очень быстро, буквально с первого предъявления? Модель объемлющих характеристик позволяет ответить на этот вопрос. Вложенные сенсорные характеристики определяют такую структуру восприятия, которая облегчает формирование новых категорий. Формирование категорий никогда не начинается с нуля. Всегда существует широкий ассортимент признаков и первичных объемлющих характеристик, которые могут служить компонентами новых категорий. Одновременно существуют сформированные объемлющие характеристики более высокого уровня, которые могут включать в себя новые категории. Например, новое слово может быть характеристикой, объемлющей новую комбинацию известных ранее слогов, что ускоряет процесс его формирования. С другой стороны, это слово с первого предъявления может встраиваться в сформированную ранее логико-грамматическую структуру, выражающую отношения между словами, фразу — объемлющую характе-

ристику более высокого уровня. Таким образом, новая сенсорная категория любого когнитивного уровня может формироваться очень быстро, несмотря на то, что в основе восприятия лежат процессы обучения.

Аналогичная процедура распознавания незнакомого объекта следует из нейрофизиологической модели сенсориума [43]. В этой модели предъявление незнакомого объекта активирует нейроны низких синаптических уровней, только те из них, которые соответствуют знакомым свойствам и под-свойствам этого незнакомого объекта. Постановка в соответствие этому новому объекту (как целому) нового символического нейрона завершает процедуру обучения.

В модели вложенных сенсорных характеристик, с физиологической точки зрения, каждый нейронный уровень осуществляет перцепцию на множестве нейронных популяций нижележащего уровня, подобно тому, как первичный нейронный уровень осуществляет перцепцию на множестве рецепторов. В процессе эволюции каждый следующий нейронный уровень мог надстраиваться как новый уровень перцепции, «рецепторами» которого служили нейронные популяции нижележащего уровня. В результате мог формироваться последовательный ряд нейронных структур, обеспечивающих охват все более широкого разнообразия сенсорных качеств окружающего мира.

Каждый уровень восприятия был высшим на своем этапе эволюционного процесса, отображал витально значимые целостности и был связан со всеми координирующими, активирующими и моторными структурами нервной системы. Эти связи перцептивных уровней с другими отделами нервной системы и исполнительными органами, хотя и модифицируются в эволюционном процессе, но вероятно, сохраняются, образуя параллельный ряд подсистем, формирующих весь спектр реакций организма на сенсорные события. В основе нашего восприятия окружающего мира, включающего все модальности и масштабы сенсорных событий, от отдельных признаков до целостных образов и сцен, может лежать реакция нервной системы на параллельные входы, отображающие вложенные сенсорные характеристики стимульного поля. Целостность реакции обеспечивается высшей объемлющей характеристикой данного акта восприятия.

Типичные временные интервалы порождения объемлющих характеристик образуют иерархию: от нескольких миллисекунд — времени порождения первичных объемлющих характеристик, до нескольких секунд — времени отбора данных нескольких фиксаций взора и порождения высших объемлющих характеристик, формирующих образы или сцены. Время

порождения объемлющих характеристик является естественным количественным критерием иерархической упорядоченности сенсорных структур. Тогда организацию восприятия можно представить отношениями включения

$$P_1 \subset P_2 \subset P_3 \subset \dots \subset P_n,$$

где P_1 — перцептивный уровень, порождающий первичные объемлющие характеристики. Каждый следующий перцептивный уровень P_2 , P_3 и т. д. характеризуется временем отбора значимых целостностей приблизительно на порядок превышающем время нижележащего уровня. Здесь P_n — перцептивный уровень, порождающий высшие объемлющие характеристики.

Модель вложенных сенсорных характеристик устанавливает иерархию уровней восприятия в соответствии с их типичными временами отбора значимых целостностей. Время порождения объемлющей характеристики является динамическим параметром процесса восприятия и, как параметр, оно аналогично времени установления (релаксации) в механике и физике. Этот количественный критерий позволяет разделить динамическую структуру процессов восприятия на качественно различные подсистемы, формирующие значимые целостности различных иерархических уровней. Динамическая организация, представленная отношениями включения, позволяет, в частности, использовать формальный аппарат теории сингулярно возмущенных дифференциальных (или интегро-дифференциальных) уравнений для построения имитационных моделей многоуровневых систем восприятия и это влечет за собой тем более значительное уменьшение объема вычислений, чем сложнее исходная задача.

Нисходящая стимуляция

Передача возбуждения по сенсорным путям не является простым восходящим процессом. Обилие и упорядоченность обратных проекций с верхних нейронных уровней восприятия на нижние, включая таламус и более глубокие структуры мозга, свидетельствуют о важной роли обратных связей. В соответствии с изложенными ранее представлениями, передача детальных данных сверху по обратным проекциям невозможна, так как на верхних уровнях их просто нет. Но возможна передача возбуждения, отображающего объемлющие характеристики, из ассоциативной коры на нейронные структуры нижележащих уровней. Возбуждение, передаваемое сверху вниз, может избирательно стимулировать нейронные популяции нижележа-

щих уровней, облегчая передачу тех компонентов сенсорного возбуждения, которые соответствуют данной объемлющей характеристике. Например, если объемлющей характеристикой является решетка, то могут стимулироваться нейронные популяции нижележащего уровня, реагирующие на линии определенной ориентации.

На рис. 5 показана схема восприятия по одному из сенсорных путей. Мы полагаем, что передача возбуждения вниз происходит только на непосредственно нижележащий уровень обработки. Стимуляция нейронных структур, отображающих различные сенсорные характеристики одного перцептивного уровня, позволяет связать их в осмысленное целое. Например, определенное сочетание формы и цвета может отображать объект, а определенное сочетание объектов может отображать образ или сцену.

Обратные связи образуют каскад переноса возбуждения сверху вниз в соответствии с иерархией вложенных сенсорных характеристик. Стимуляция сверху может облегчать передачу тех компонентов сенсорного возбуждения, которые соответствуют высшей объемлющей характеристике данного акта восприятия. Многоуровневый иерархический отбор сенсорных признаков и адаптивно значимых целостностей обеспечивает передачу в вышестоящие структуры мозга только тех сенсорных данных, которые отвечают потребностям и целям организма.

В чем состоит физиологический механизм стимуляции сверху? Мы полагаем, что стимуляция сверху уменьшает время реакции отобранных нейронов нижележащего уровня на одновременно приходящие спайки до миллисекундного диапазона [25]. В результате популяции нейронов нижележащего уровня, участвующие в данном акте восприятия, на короткое время становятся детекторами совпадений. Они интенсивно отвечают на синхронное сенсорное возбуждение, вызванное стимулом, и слабо реагируют на сигналы, распределенные во времени.

Объемлющая характеристика, посредством стимуляции сверху, отбирает популяции нейронов нижележащего уровня, которые могут отображать признаки данного объекта по прошлому опыту. Те признаки данного объекта в данном месте, которые действительно обнаружены рецепторами, отображаются когерентной разрядкой активированных популяций. Тем самым стимул отбирает ансамбль популяций, участвующих в данном акте восприятия, из совокупности, активированной сверху. Посредством итераций по всем иерархическим уровням сверху вниз и снизу вверх синхронизируется уникальный набор нейронных ансамблей. Этот набор ансамблей из детекторов совпадений формирует быстрый сенсорный путь, единственный и



Рис. 5. Схема восприятия по одному из сенсорных путей. Обратные проекции образуют многозвенный каскад нисходящего возбуждения. Тонкие стрелки показывают входы от других нейронных структур.

уникальный для каждого акта восприятия.

Существуют различные способы уменьшения времени реакции нейронов посредством стимуляции сверху. Эта довольно сложная проблема требует специального изучения, и мы не будем здесь на ней останавливаться. Заметим только, что можно управлять чувствительностью нейрона к одновременно приходящим спайкам посредством изменения временной константы его мембраны. Более прямой способ состоит в том, чтобы непосредственным возбуждением сверху перевести нейроны отобранных популяций в состояние, близкое к порогу срабатывания. Известно [44], что состояние, близкое к порогу срабатывания, характерно для нейронов коры. Ответ нейронного ансамбля в предпороговом состоянии на одновременно

приходящие спайки может быть высоко когерентным.

Стимуляция сверху, соответствующая объемлющей характеристике, отбирает и синхронизирует разрядку нейронов согласно критерию значимой целостности для каждого данного уровня обработки. Если это действительно так, то в ответ на стимул должна наблюдаться точная синхрония разрядки нейронов, принадлежащих различным специализированным областям зрительной коры, но относящихся к одному уровню перцептивной иерархии.

Такая схема позволяет понять, почему в пространственно разделенных нейронах возникает синхронизация, если они отвечают на один и тот же зрительный объект. Если два пространственно разделенных нейрона отвечают на один объект, то они одновременно стимулируются сверху одной и той же объемлющей характеристикой и их разрядка может быть синхронной с точностью до миллисекунд. Если эти два нейрона отвечают на разные объекты, существующие одновременно, то они стимулируются сверху разными объемлющими характеристиками и нет причин для точной синхронизации их разрядки.

Синхронизация разрядки нейронов посредством избирательной стимуляции сверху может возникать на самой ранней стадии восприятия, как только сформируется первичная объемлющая характеристика, выражающая качественную специфичность квазиобъекта. Стимуляция становится более избирательной, если квазиобъект окажется объектом, качественная специфичность которого выражается объемлющей характеристикой более высокого уровня. Такой процесс может увеличивать точность синхронии разрядки нейронов данного уровня обработки, отвечающих на данный объект. Тогда популяции нейронов, отвечающие на данный объект, оказываются связанными синхронией, что отделяет их от других популяций нейронов, синхронно отвечающих на другие объекты. Такой механизм синхронии, как кажется, может выделять объект из фона и отделять его от других объектов, даже если они частично маскируют друг друга.

Стимуляция сверху, соответствующая объемлющей характеристике объекта, может синхронизировать активность нейронов, отвечающих на разные части объекта, даже если эти части имеют несходные признаки. Принадлежность частей одному объекту, а не сходство их признаков, является необходимым условием синхронии. Это решает проблему, о которой пишут *P. R. Roelfsema et al.* [42]: «Однако, отдельные объекты могут состоять из частей, показывающих довольно несходные признаки, и это открытый вопрос, имеет ли место синхронизация, и если имеет, то как нейроны, отве-

чающие на несходные признаки отдельного объекта, синхронизируются?»

Трудность связывания несходных частей целого относится к более общей проблеме, которую *Р. Миллер* сформулировал (в частной переписке) следующим образом: «Как может существовать органическое единство между компонентами, у которых также может иметься своя собственная отдельная индивидуальность?» Создать органическое единство из частей, обладающих индивидуальностями, вероятно, невозможно никакими техническими средствами, даже такими мощными, как синхронизация разрядки нейронов. Но можно обнаружить естественную принадлежность индивидуальностей к единству более высокого уровня. Объемлющая характеристика как раз и выражает это органическое единство более высокого иерархического уровня.

Объемлющая характеристика должна порождать феномен превосходства целого над частью. Действительно, эффекты превосходства сцены, объекта, фразы, слова и т. п. существуют в самом деле [45]. Например, эффект превосходства слова состоит в ускорении восприятия букв в контексте слова по сравнению с восприятием отдельных букв. Слово, предъявленное в смысловом контексте, воспринимается быстрее, чем при изолированном предъявлении. Ложная смысловая преднастройка увеличивает время реакции, и это вполне понятно: ложная объемлющая характеристика порождает специфическую стимуляцию сверху, что мешает восприятию сенсорных признаков реального стимула.

Формирование объемлющей характеристики объекта является ключевым моментом, с которого начинается стимуляция сверху, синхронизирующая все нижележащие уровни, ответственные за восприятие этого объекта. Когерентность и интенсивность отображения объекта возрастают, что может увеличивать его заметность на психическом уровне. Воспринимаемый объект должен отображаться более интенсивно по сравнению с окружающим фоном, даже если освещенность объекта и фона одинаковы. Объект может восприниматься субъективно как более светлый или более яркий с момента его распознавания.

Действительно, экспериментальные данные показывают, что сочетание фигуры и фона оказывает «поразительное» влияние на восприятие светлоты [46, 47]. Участок изображения, воспринимаемый как фигура, кажется светлее, чем фон. Фигура, как правило, кажется более светлой или более интенсивной (по цвету), нежели фон с такой же светлотой. *Х. Шиффман* [47] приходит к выводу, что эффект светлоты вторичен по отношению к восприятию фигуры. Это хорошо согласуется с нашей моделью восприя-

тия, согласно которой более высокая интенсивность отображения объекта является результатом его распознавания.

Объекты выделяются из фона и распознаются из-за их важности для жизни субъекта в окружающем мире. Поэтому, как это ни удивительно, интенсивность или яркость восприятия объектов должна зависеть от их субъективно переживаемой витальной значимости. Из повседневного опыта мы знаем, что знакомое лицо в толпе «бросается в глаза». Оно предстает с такой интенсивностью, что все остальное становится фоном. Знакомые очертания здания в незнакомом городе, опасный объект, привлекательный человек, животное или пейзаж — все это субъективно значимые события, которые воспринимаются с высокой интенсивностью за счет стимуляции сверху.

В этом отношении большой интерес представляет выяснение механизмов восприятия рисунков, имеющих две или больше интерпретаций. В ответ на предъявление двусмысленного рисунка, восприятие порождает различные образы, хотя рисунок остается одним и тем же. Известно, что восприятие определенного образа зависит от того, какие части рисунка интерпретируются как фон, а какие — как объект [47]. Но остается неясным, почему система восприятия относит некоторые части рисунка к объекту и как отделяет их от окружающего фона.

Объемлющая характеристика объекта — это перцептивная гипотеза, в порождении которой решающее значение имеют хорошо известные субъекту образы или объекты. Распознавание любых признаков очертаний знакомого объекта может порождать перцептивную гипотезу и стимуляцию сверху, которая отбирает те части рисунка, которые относятся к этому объекту. Когерентное отображение отобранных признаков порождает интенсивное восприятие объекта, что выделяет его из окружающего фона.

Как только перцептивная гипотеза подтверждается, она начинает тормозить любые другие интерпретации рисунка. Но время доминирования подтвержденной гипотезы ограничено временем привыкания нейронных структур, которое, судя по экспериментам с фиксированным изображением на сетчатке глаза, составляет несколько секунд. По истечении этого времени, возможно схватывание характерных очертаний другого объекта из деталей того же рисунка, что вызывает интенсивное отображение этого объекта и обращение в фон всех остальных деталей.

Из нашей концепции следует, что первыми должны схватываться очертания того объекта, который наиболее хорошо знаком субъекту. Если такого объекта на двусмысленном рисунке нет, требуется подсказка, чтобы

субъект мог увидеть один из объектов. Если нет подсказки, необходимо длительное разглядывание и работа воображения, чтобы увидеть на таком рисунке неожиданный или мало знакомый объект.

Мозг обнаруживает сенсорные объекты, а не комбинирует их из признаков

В первичной проекционной коре отображаются локальные признаки стимульного поля, такие как границы, линии, углы, пятна и т. п., которые по своей сути являются дифференциальными характеристиками. На следующих уровнях зрительного восприятия дифференциальные данные первичной проекционной коры дифференцируются по сенсорным субмодальностям, порождая разделенные отображения цвета, движения и других признаков стимульного поля в различных областях претриарной коры.

Эти факты с полной очевидностью показывают, что мозг не интегрирует сенсорные сигналы, а извлекает из них дифференциальные признаки. Дифференциация обеспечивает формирование многомерного пространства признаков, соответствующих каждому акту восприятия. Дифференциация в разных аспектах обнаруживает специфичность актуального стимульного поля и, в сущности, является средством многоуровневого отображения специфичности. Дифференциальные признаки, обнаруженные любой нейронной структурой, должны передаваться на множество других нейронных структур. Следовательно, дивергенция сигналов, на каждом уровне обработки, является необходимым свойством системы восприятия.

Специфические сочетания признаков соответствуют значимым целостностям различных когнитивных уровней. Система восприятия выявляет специфичность стимульного поля посредством дифференциации сенсорного возбуждения в разных аспектах, и порождает иерархию характеристик, объемлющих специфические сочетания признаков. Поэтому дивергенция и конвергенция сигналов должны осуществляться на каждом уровне обработки, как это показано на рис. 2 и 3. Отсюда становится понятной функциональная организация коркового нейрона, который имеет тысячи входов от других нейронов, что обеспечивает конвергенцию сигналов. Единственный выход через аксон, посредством ветвления на его конце, обеспечивает дивергенцию сигнала и его передачу на тысячи других нейронов.

Нейронная структура, отображающая сенсорный объект, имеет множество входов, но только один выход — специфический паттерн электрической

активности, который отображает объемлющую характеристику и передается на множество других нейронных структур. Это напоминает систему связей одиночного нейрона, который имеет множество входов через дендриты и только один выход через аксон. Функциональная организация микроуровня, вероятно, повторяется на множестве иерархически упорядоченных макроуровней системы восприятия.

Мозг, с его медленными нейронами, обладает более высокой скоростью распознавания объектов окружающего мира по сравнению с компьютером. В качестве причины высокой эффективности мозга обычно указывают на массиванно-параллельную архитектуру, которая обеспечивает высокую скорость вычислений. Это обстоятельство, конечно, важно. Но еще более существенно то, что мозг ничего не вычисляет. Уже на ранних стадиях восприятия мозг, на основании прошлого опыта, порождает перцептивные гипотезы о содержании зрительного поля и проверяет эти гипотезы. Мозг не столько распознает, сколько «догадывается» о том, что видит.

Современная парадигма восприятия основана на представлениях о том, что мозг комбинирует, связывает или интегрирует признаки в образы или объекты. Такие представления будто бы подтверждаются обширными экспериментальными данными. Однако рассмотрение этих экспериментов показывает, что предлагаемые интерпретации их результатов не являются единственно возможными. Например, в известных экспериментах *А. Трейсман* [48, 49] испытуемым предлагали найти символ доллара среди знаков *S* и отрезков прямых. Испытуемые обнаруживали символ доллара в этих условиях. Но они часто видели символ доллара и в тех случаях, когда на изображениях его на самом деле не было. Если знаки *S* демонстрировались совместно с треугольниками так, что одна из сторон треугольника могла бы дополнять знак *S* до символа доллара, испытуемые также часто видели иллюзорный символ доллара. *А. Трейсман* делает вывод, что иллюзорный символ доллара возникает из-за ошибочной комбинации признаков (*S* и отрезка прямой), даже когда отрезок принадлежит другому объекту.

Однако результаты этих экспериментов можно интерпретировать иначе. Знак *S* — это специфический признак символа доллара, который демонстрируется на дисплее. Если времени экспозиции достаточно, чтобы распознать знак *S*, то система восприятия может породить перцептивную гипотезу — символ доллара. С другой стороны, если времени экспозиции недостаточно для проверки этой гипотезы, символ доллара может оказаться иллюзорным. Таким образом, условием возникновения иллюзии, в данном эксперименте, является длительность экспозиции, которая должна быть достаточной для

распознавания специфического признака S , но недостаточной для проверки перцептивной гипотезы — символа доллара. Увеличение длительности экспозиции позволяет испытуемым легко обнаруживать отсутствие символа доллара среди знаков S и отрезков прямых (или треугольников).

В другой серии экспериментов демонстрировались прямые углы, составленные двумя отрезками, и отдельные отрезки, которые могли бы дополнять их до треугольников. Испытуемые изредка видели треугольники, которых на самом деле не было. Однако, если изображение дополнялось кружочками, то испытуемые видели треугольники гораздо чаще. По мнению А. Трейсмана [49], кружочки вносили новый признак — замкнутость фигуры, что приводило к формированию системой восприятия ошибочной комбинации — замкнутого треугольника.

Специфическими признаками треугольников являются углы, образованные парами отрезков. Распознавание специфического признака может породить перцептивную гипотезу — треугольник. Время экспозиции, в данном эксперименте, оказывается достаточным не только для порождения, но и для проверки перцептивной гипотезы, поэтому испытуемые редко видят иллюзорный треугольник. Но если изображение дополняется кружочками, оно становится значительно сложнее и прежнего времени экспозиции оказывается недостаточно для проверки гипотезы, поэтому испытуемые чаще видят иллюзорный треугольник. Простое увеличение длительности экспозиции ведет к исчезновению иллюзии. Таким образом, отсутствуют основания постулировать способность системы восприятия комбинировать разрозненные признаки в замкнутые геометрические фигуры.

Можно показать, что и никакие другие эксперименты не доказывают способность системы восприятия комбинировать или интегрировать сенсорные признаки. Зато известные экспериментальные данные хорошо совмещаются с идеей о том, что система восприятия обнаруживает сочетания признаков, образующих значимые целостности.

Мозг не комбинирует и не интегрирует сенсорные данные, а обнаруживает такие специфические сочетания дифференциальных признаков, которые соответствуют значимым объектам или событиям. Термин «комбинировать» означает, что система восприятия может создавать сенсорные объекты из признаков, как это следует из работ А. Трейсмана [48, 49] и многих других. Термин «обнаруживать» означает, что система восприятия может находить такие специфические сочетания признаков, которые соответствуют сенсорным объектам. Например, система восприятия не связывает три отрезка в треугольник. Но если три отрезка соединены концами, то система

восприятия обнаруживает эту специфическую комбинацию как значимую целостность — треугольник. Ассоциативная структура любого уровня восприятия не комбинирует признаки, а обнаруживает (находит) адаптивно значимые сочетания признаков. «Комбинировать» или «обнаруживать» — это не игра в слова. За этими словами стоят принципиально разные концепции, из них мы выбираем ту, которая соответствует нашему пониманию природы восприятия.

Специфическое сочетание признаков, выражающее значимую целостность, является сенсорным основанием для перцептивной гипотезы — объемлющей характеристики объекта. Например, специфическое пространственное сочетание отрезков и их пересечений (крестообразных фигур) может служить сенсорным основанием для перцептивной гипотезы — треугольника, квадрата или другой плоской фигуры. Специфическое пространственное сочетание плоских фигур может служить сенсорным основанием для формирования объемлющей характеристики трехмерного объекта.

Поверхности трехмерного объекта имеют различную экспозицию по отношению к источнику света и, поэтому, должны отличаться освещенностью. Первичные объемлющие характеристики, в этом случае, определяют конфигурацию поверхностей разной освещенности. Специфическое сочетание поверхностей разной освещенности может служить сенсорным основанием для формирования объемлющей характеристики трехмерного объекта. Специфическое сочетание поверхностей разного цвета или разных оттенков одного цвета также может служить сенсорным основанием для формирования объемлющей характеристики трехмерного объекта.

Заметим, что хотя поверхности выражаются объемлющими характеристиками, по отношению к трехмерной фигуре они выполняют функции признаков, дающих сенсорное основание для порождения перцептивной гипотезы, — объемлющей характеристики объекта. Тогда сенсорным основанием для порождения объемлющей характеристики трехмерного объекта могут служить: специфическое сочетание отрезков и крестообразных фигур, сочетание поверхностей разной освещенности, сочетание поверхностей разного цвета или разных оттенков одного цвета и другие. Каждый из этих наборов признаков может порождать объемлющую характеристику объекта, если соответствующие нейронные структуры обучены распознавать этот объект.

В такой системе восприятия один и тот же трехмерный объект распознается одновременно и параллельно на основе сочетаний разных специфических признаков. Нейронные структуры каждого сенсорного пути отвечают

высокой активностью на те и только те признаки или их сочетания, которые они обучены распознавать. Такая система восприятия может обладать высокой надежностью, поскольку при повреждении одной или нескольких нейронных структур, способность к восприятию может сохраняться за счет параллельного функционирования других нейронных структур.

Объемлющая характеристика объекта отображается специфическим паттерном электрической активности, который передается на нейронные структуры нижележащего уровня, отображающие признаки данного объекта в данном месте. Те признаки, которые действительно обнаруживаются рецепторами в это время и в этом месте, акцентируются благодаря стимуляции сверху. Интенсивность отображения объекта возрастает, что может служить сенсорным подтверждением перцептивной гипотезы.

Перцептивные гипотезы порождаются в параллельных путях, подтверждая друг друга и обеспечивая высокую надежность восприятия. Если только часть сенсорных путей порождает согласованную перцептивную гипотезу, это не должно препятствовать распознаванию объекта, хотя скорость восприятия может уменьшаться. Подтверждение перцептивной гипотезы, в этом случае, требует дополнительной стимуляции сверху и повторения процедуры распознавания, что увеличивает время восприятия. Какова бы ни была объемлющая характеристика объекта, она должна соответствовать высшей объемлющей характеристике данного акта восприятия - зрительной сцене. Если объемлющая характеристика объекта не соответствует содержанию или смыслу сцены, то это должно вызывать ориентировочную реакцию и порождение новой перцептивной гипотезы.

Порождение объемлющей характеристики объекта не требует присутствия в поле зрения всех его признаков. Частичный набор специфических признаков может служить сенсорным основанием для порождения перцептивной гипотезы. Поэтому система восприятия может эффективно функционировать в условиях недостатка сенсорных данных. Время восприятия может быть небольшим, поскольку перцептивные гипотезы порождаются на основе данных первых корковых уровней обработки, а время ответа нейронных структур переводится в миллисекундный диапазон посредством стимуляции сверху.

Нейронные структуры восприятия не обучены распознавать шумы и, поэтому, не могут отвечать на них интенсивной активностью. Каждый уровень обработки игнорирует шумы как незначимые сигналы, а их передача вверх по сенсорному пути не стимулируется сверху. Система восприятия не столько фильтрует шумы, сколько просто их игнорирует. Таким образом,

модель объемлющих характеристик отвечает принципу оптимальности: она требует минимум сенсорной информации, осуществляет процедуру распознавания за минимальное время, игнорирует шумы любого происхождения и обладает высокой живучестью, поскольку может эффективно функционировать даже в случае частичного повреждения нейронных структур.

Компьютерные эксперименты по распознаванию трехмерных объектов

Подходящий математический аппарат, позволяющий описать иерархию объемлющих характеристик, дает теория графов. В качестве первой версии модели, построен алгоритм распознавания объектов на перспективной проекции сцены, составленной из белых прямых параллелепипедов с черными ребрами на белом фоне [27, 28]. Поскольку перспективная проекция переводит отрезок в отрезок, то можно считать, что на вход подается набор отрезков. Такая упрощенная постановка задачи позволяет сосредоточить внимание на содержательной стороне проблемы распознавания: среди разрозненных и не наделенных функциональным смыслом входных данных (отрезков) обнаружить важные для функционирования организма трехмерные объекты. Похожая задача может возникать перед роботом, который перекладывает коробки на складе, или разбирает нагромождение из кирпичей. В табл. 1 представлена иерархия объемлющих характеристик, соответствующая этой задаче.

Поиск объемлющих характеристик (значимых целостностей) сводится к тому, чтобы: (1) выявить типы парных (двуместных) отношений между характеристиками из правой части таблицы; (2) построить граф-шаблон, где вершинами будут характеристики из правой части таблицы, а ребрами — отношения между ними; (3) построить граф-данные, где вершинами будут все характеристики нижележащего уровня, а ребрами — их отношения; (4) найти все изоморфные вложения графа-шаблона в граф-данные (как части, с учетом типов отношений); (5) для каждого вложения проверить определение, указанное в правой части таблицы.

Описанная процедура применяется для построения объемлющих характеристик второго уровня, затем третьего уровня и так далее, вплоть до высших объемлющих характеристик — прямых параллелепипедов. Схема формирования иерархии объемлющих характеристик показана на рис. 6.

Разработан алгоритм поиска изоморфных вложений графа-шаблона в

Таблица 1. Иерархия объемлющих характеристик в задаче распознавания прямых параллелепипедов. Слова, набранные жирным шрифтом, означают объемлющие характеристики, все остальное — общепринятые термины.

Перцептивный уровень	Объемлющая характеристика	Пространственная организация: определение объемлющих характеристик в терминах нижележащих уровней
1 В картинной плоскости	Отрезок	Отрезок
	Псевдоотрезок	Или отрезок, или два отрезка, лежащие на одной прямой
2 В картинной плоскости	Плоская Y-фигура	Три отрезка , попарно не лежащие на одной прямой, но имеющие общую для всех трех вершину
	Плоский четырехугольник	Четыре псевдоотрезка , такие, что каждый из них: 1) имеет общую вершину с предыдущим и с последующим, и не лежит ни с одним из них на одной прямой; 2) не пересекается с псевдоотрезком через одного
3 В трехмерном пространстве	Прямой трехгранный угол	Одна плоская Y-фигура , такая, что она может быть проекцией прямого трехгранного угла
	Прямоугольник	Один плоский четырехугольник , такой, что восстановленный по нему параллелограмм: 1) является прямоугольником; 2) целиком находится в той же стороне от фокуса, что и картинная плоскость
4	Прямой параллелепипед	Определение опущено из-за громоздкости выражения.

граф-данные, важным достоинством которого является линейная зависимость времени счета от числа вершин в графе-данных. Такой алгоритм, при увеличении количества объектов на предъявляемом изображении, не ведет к взрывообразному росту объема вычислений.

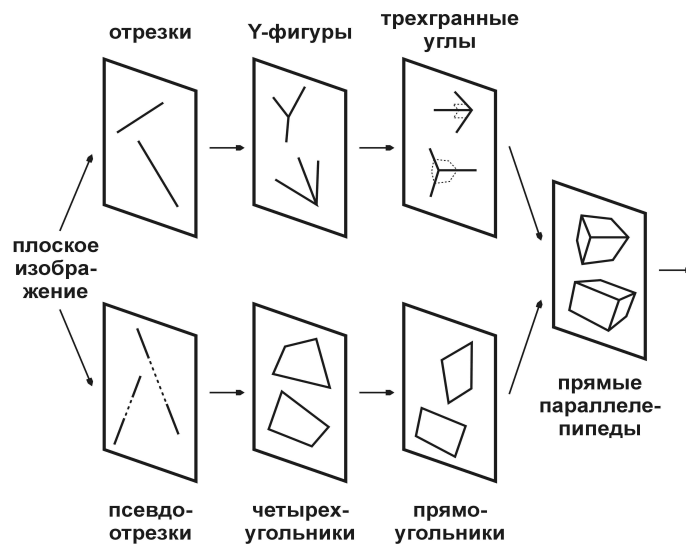


Рис. 6. Схема формирования иерархии объемлющих характеристик в процессе распознавания прямых параллелепипедов. Объекты первого и второго уровней обработки лежат в картинной плоскости, объекты третьего и четвертого уровней расположены в трехмерном пространстве.

Алгоритм распознавания реализован в виде программы на языке C++ [28]. Исходная конфигурация объектов для распознавания задается в текстовом файле. Этот файл строится специальной программой рендеринга и состоит из наборов по 6 чисел. Каждый набор задает один отрезок: первые 3 числа определяют начало отрезка, последние 3 числа — его направление и протяженность (2 из 6 чисел оказываются одинаковыми для всех отрезков, поскольку все они лежат в картинной плоскости). Эксперименты по распознаванию производились на компьютере с процессором Pentium-IV (2400 МГц, 512 Мб оперативной памяти).

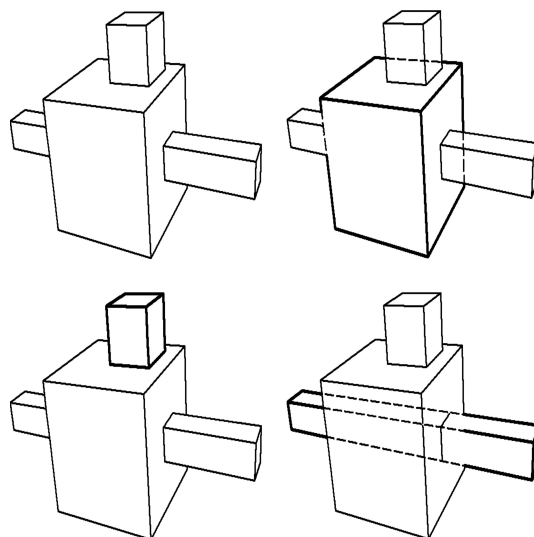


Рис. 7. Результаты компьютерного распознавания параллелепипедов, конфигурация которых показана слева вверху. Жирными линиями показаны отрезки, которые программа выделяет в качестве признаков, позволяющих сформировать перцептивную гипотезу. Пунктирными линиями программа достраивает распознанные параллелепипеды.

На рис. 7, 8 и 9 представлены примеры распознавания трехмерных геометрических объектов. На рис. 9 справа внизу пунктиром показан иллюзорный кубик. Иллюзия возникает потому, что в данной версии модели распознавания отсутствуют обратные связи и ложная перцептивная гипотеза не может быть опровергнута.

Выполнены многочисленные эксперименты по распознаванию трехмерных геометрических объектов. Компьютерные эксперименты показали, что геометрические объекты успешно распознаются во всех случаях, когда их проекции состоят хотя бы из двух граней, и ни одна из вершин не скрыта за другими объектами. Частичная маскировка граней другими объектами не создает препятствий для распознавания. Таким образом углы оказываются ключевыми признаками для идентификации трехмерных геометрических фигур. Этот результат хорошо согласуется с психофизиологическими экспериментами *И. А. Шевелева* с соавторами [50], где показано, что X-

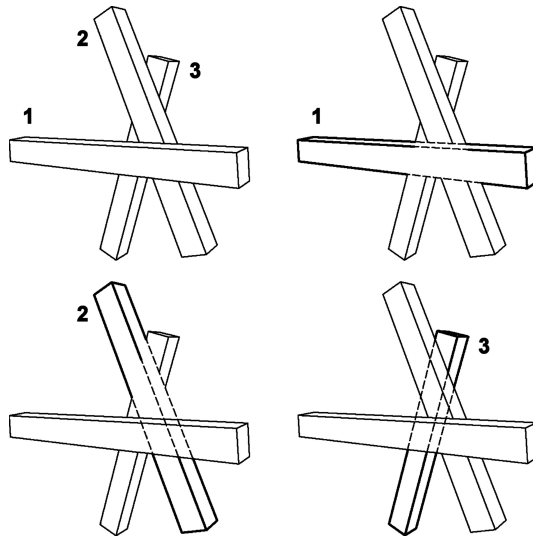


Рис. 8. Пример распознавания трех параллелепипедов. Жирными линиями показаны отрезки, специфическое сочетание которых программа идентифицирует как параллелепипед. Пунктиром показаны линии, достроенные распознающей программой.

образные фигуры и их фрагменты играют ключевую роль при восприятии человеком геометрических объектов.

Опыт успешного компьютерного распознавания трехмерных объектов, а также характер трудностей, возникающих при распознавании (например, возникновение иллюзорных объектов), очень напоминают соответствующий опыт восприятия человеком геометрических фигур. Это обстоятельство позволяет задать вопрос, имеет ли компьютерная процедура (рис. 6) какое-либо сходство с процессом распознавания человеком геометрических объектов? Распознавание геометрического объекта данного уровня является результатом формирования характеристики, объемлющей значимые геометрические объекты нижележащего уровня. В связи с этим интересны экспериментальные данные по возрастному развитию восприятия и способностей детей рисовать геометрические фигуры. Например, дети 4–5 лет рисуют конус в виде рядом расположенных круга и треугольника [51]. Это значит, что нейронные структуры коры, порождающие объемлющие харак-

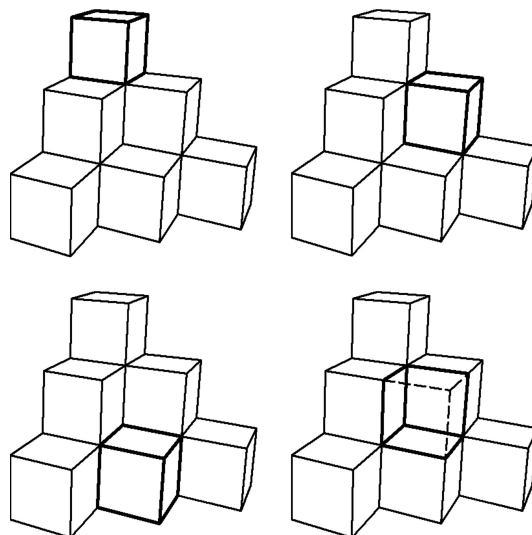


Рис. 9. Примеры компьютерного распознавания кубиков, показанные жирными линиями. Справа внизу пунктирными линиями показан иллюзорный кубик. Этот кубик построен программой на основе специфического сочетания отрезков, показанных жирными линиями.

теристики плоских фигур — круга и треугольника — уже сформированы у детей к этому возрасту. В компьютерной процедуре распознавания аналогичные функции выполняет второй уровень обработки.

Круг и треугольник представляют собой плоские признаки трехмерного объекта — конуса. Способность формировать объемлющие характеристики трехмерных объектов по плоским изображениям кажется наиболее загадочной. Проблема распознавания трехмерных фигур состоит в выявлении таких специфических пространственных отношений плоских фигур, которые соответствуют трехмерным объектам. Способности детей 4–5 лет распознавать и рисовать трехмерные фигуры возникают в процессах дальнейшего обучения и возрастного развития. Это свидетельствует о формировании, посредством обучения, нейронных структур, порождающих объемлющие характеристики трехмерных объектов. В компьютерной модели распознавания такие функции выполняют третий и четвертый уровни обработки. Таким образом, компьютерная процедура, реализующая иерархию объем-

лющих характеристик, возможно, в какой то мере аналогична процессу распознавания человеком трехмерных объектов. Это предположение требует дальнейшего изучения, что вполне возможно, поскольку, с одной стороны, имеются обширные экспериментальные данные по возрастному развитию восприятия человеком геометрических фигур. С другой стороны, разработана модельная основа для компьютерных экспериментов, правдоподобно имитирующих процессы распознавания трехмерных геометрических объектов.

Заключение

В работе предлагается новый взгляд на организацию процесса восприятия. Вводится понятие объемлющей сенсорной характеристики, которая является ответом данного перцептивного уровня на те признаки или характеристики нижележащего уровня, пространственная организация или специфическая временная последовательность которых составляет адаптивно значимую целостность. Последовательность объемлющих характеристик образует иерархию: от признаков до высших объемлющих характеристик, выражающих целостные образы и сцены. Иерархия объемлющих характеристик — это путь от восприятия физических к формированию семантических характеристик.

Специфические паттерны электрической активности, отображающие объемлющие характеристики, посредством обратных связей передаются с верхних нейронных уровней на нижние. Это формирует каскад переноса возбуждения сверху вниз, стимулирующий те нейронные структуры, сигналы которых соответствуют высшей объемлющей характеристике данного акта восприятия. В каскадной схеме передача возбуждения происходит только на непосредственно нижележащий уровень обработки. Стимуляция нейронных структур, отображающих различные сенсорные характеристики одного перцептивного уровня, позволяет связать их в осмысленное целое.

Стимуляция сверху уменьшает время реакции отобранных нейронов нижележащих уровней до миллисекундного диапазона. В результате нейронные популяции нижележащих уровней, участвующие в данном акте восприятия, на короткое время становятся детекторами совпадений. Иерархически упорядоченный набор нейронных ансамблей из детекторов совпадений формирует быстрый сенсорный путь, единственный и уникальный для каждого акта восприятия.

Иерархия объемлющих сенсорных характеристик и каскадный перенос

специфического возбуждения сверху вниз образуют единый психофизиологический механизм восприятия. Многоуровневый иерархический отбор сенсорных признаков и значимых целостностей обеспечивает передачу в вышестоящие структуры мозга только той информации, которая отвечает потребностям и целям организма. Мозг не фильтрует и не подавляет избыточные сигналы и шумы, он просто их игнорирует.

Гипотеза объемлющих характеристик приводит к концепции восприятия, необходимыми свойствами которой являются иерархичность организации, синхронизация нейронной активности и нисходящая стимуляция. Таким образом, наиболее активно дискутируемые теоретические воззрений на природу восприятия оказываются естественным образом связанными в единой концепции. При этом, сами теоретические представления приобретают иное качество и функциональный смысл. Например, вопреки традиционным представлениям об иерархической организации восприятия как последовательности от простого к сложному, иерархия объемлющих характеристик является последовательностью от сложного к простому. Стимуляция сверху не отбирает определенные объекты из множества возможных. Стимуляция сверху уменьшает время реакции целевых нейронов нижележащих уровней до миллисекундного диапазона. Объемлющая характеристика, посредством стимуляции сверху, отбирает популяции нейронов, которые могут отображать признаки данного объекта по прошлому опыту. Если эти признаки действительно обнаруживаются рецепторами, «специфические ворота» для соответствующего сенсорного возбуждения оказываются открытыми.

В рассматриваемой концепции многие проблемы современных теорий восприятия или не существуют, или имеют ясные перспективы решения. Структура модели восприятия делает невозможным и ненужным существование всезнающего гомункулуса, но обладает столь же широкой универсальностью в отношении объяснения феноменов восприятия. Выясняются когнитивные механизмы, обеспечивающие легкость обучения человека и высших животных новым сенсорным категориям, которое может происходить буквально с первого предъявления. Теоретические следствия модели имеют разносторонний характер и формулируются в конкретной форме, что делает их доступными экспериментальной проверке в лабораторных условиях. Компьютерные эксперименты демонстрируют работоспособность модели и подтверждают широкие возможности дальнейших теоретических и экспериментальных исследований восприятия на новой концептуальной основе.

Литература

1. Хьюбел Д. Глаз, мозг и зрение. – М.: Мир, 1990. – 240 с.
2. Прибрам К. Языки мозга. – М.: Прогресс, 1975. – 464 с.
3. Солсо Р.Л. Когнитивная психология. – М.: Тривола, 1996. – 598 с.
4. Ghose G. M., Maunsell J. Specialized representations in visual cortex: A role for binding? // *Neuron*. – 1999. – v. 24, No. 1. – pp. 79–85.
5. Hubel D., Wiesel T. Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex // *J. Physiol.* – 1962. – v. 160. – pp. 106–154.
6. Игумен Феофан (Крюков). Сенсорная интеграция: иерархичность и синхронизация // *Нейроинформатика-2005*. VIII Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. – 2005. т. 2. – Москва: МИФИ, с. 79–92.
7. Stringer S. M., Rolls E. T. Invariant object recognition in the visual system with novel views of 3D objects // *Neural. Comput.* – 2002. – v. 14. – pp. 2585–2596.
8. Treisman A. Solutions to the binding problem: progress through controversy and convergence // *Neuron*. – 1999. – v. 24. – pp. 105–110.
9. Watt R. J., Phillips W. A. The function of dynamic grouping in vision // *Trends Cogn. Sci.* – 2000. – v. 4. – pp. 447–454.
10. Bar M. Top-Down Facilitation of Visual Object Recognition Neurobiology of Attention, L. Itti, G. Rees, and J.K. Tsotsos (Eds.) – Elsevier Academic Press, Amsterdam, 2005. – pp. 140–145.
11. Giesbrecht B., Woldorff M. G., Song A. W., Mangun G. R. Neural mechanisms of top-down control during spatial and feature attention // *Neuroimage*. – 2003, v. 19. – pp. 496–515.
12. Driver J., Eimer M., Macaluso E., van Velsen J. The neurobiology of human spatial attention: modulation, generation and integration // *Functional Neuroimaging of Visual Cognition: Attention and Performance, XX* / Eds: Kanwisher N., Duncan J. – Oxford: Oxford University Press, 2004. – pp. 267–299.
13. Thorpe S. D. Fize D., C. Marlot C. Speed of processing in the human visual system // *Nature*. – 1996, v. 381. – pp. 520–522.
14. Ungerleider L., Haxby J. “What” and “Where” in the human brain // *Curr. Opin. Neurobiol.* – 1994, v. 4. – pp. 157–165.
15. Malsburg C. von der. Binding in models of perception and brain function // *Curr. Opin. Neurobiol.* – 1995, v. 5. – pp. 520–526.
16. Singer W. Neuronal synchrony: A versatile code for the definition of relations? // *Neuron*. – 1999, v. 24. – pp. 49–65.

17. Engel A. K., Roelfsema P. R., Fries P., Brecht M., Singer W. Role of the temporal domain for response selection and perceptual binding // *Cereb. Cortex.* – 1997, v. 7. – pp. 571–582.
18. Singer W., Gray C. M. Visual feature integration and the temporal correlation hypothesis // *Ann. Rev. Neurosci.* – 1995, v. 18. – pp. 555–586.
19. Roelfsema P. R., Engel A. K., König P., Singer W. Visuomotor integration is associated with zero time-lag synchronization among cortical areas // *Nature.* – 1997, v. 385. – pp. 157–161.
20. Schmolesky M. T., Wang Y., Hanes D. P., Thompson K. G., Leutgeb S., Schall J. D., Leventhal A. G. Signal timing across the macaque visual system // *J. Neurophysiol.* – 1998, v. 79. – pp. 3272–3278.
21. Givre S. J., Arezzo J. C., Schroeder C. E. Effects of wavelength on the timing and laminar distribution of illuminance-evoked activity in macaque V1. // *Vis. Neurosci.* – 1995, v. 12. – pp. 229–239.
22. Damasio A. R. The brain binds entities and events by multiregional activation from convergence zones // *Neural Computation.* – 1989, v. 1. – pp. 123–132.
23. Hummel J. E. Complementary solutions to the binding problem in vision: Implications for shape perception and object recognition // *Visual Cogn.* – 2001, v. 8. – pp. 489–517.
24. Zeki S. A. Vision of the brain. – Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993. – 366 pp.
25. Сергин В. Я. Механизмы зрительного восприятия: концепция объемлющих сенсорных характеристик // *Нейроинформатика-2006. VIII Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. 2006. т. 3. Москва: МИФИ.* – с. 224–235.
26. Сергин В. Я. Перцептивное связывание сенсорных событий: гипотеза объемлющих характеристик // *Журнал высшей нервной деятельности.* – 2002. т. 52, № 6. – с. 645–655.
27. Sergin A. V., Sergin V. Ya. Mechanisms of Perception: Embedded Sensory Characteristics Model // *Cybernetics and Systems '2004.* – World Scientific Publishing Co., 2004, v. 1. – pp. 216–221.
28. Сергин А. В. Компьютерная модель восприятия: Иерархия объемлющих сенсорных характеристик // *Нейроинформатика-2006. VIII Всероссийская научно-техническая конференция. Сборник научных трудов.* – 2006. т. 1. Москва: МИФИ. – с. 189–195.
29. Ухтомский А. А. Доминанта. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.

30. *Kryukov V. I.* An attention model based on the principle of dominanta // *Neurocomputers and attention. I. Neurobiology, synchronization and chaos / Eds. Holden A. V., Kryukov V. I.* – Manchester: Manchester Press, 1991. – pp. 319–351.
31. *Борисюк Г. Н., Борисюк Р. М., Казанович Я. Б., Иваницкий Г. Р.* Модели динамики нейронной активности при обработки информации мозгом — итоги «десятилетия» // *УФН.* – 2002. – т. 172, № 10. – с. 1189–1214.
32. *Borisyuk R. M., Kazanovich Y. B.* Oscillatory neural network model of attention focus formation and control // *Biosystems.* – 2003, v. 71. – p. 29–38.
33. *Игумен Феофан (Крюков).* Модель внимания и памяти, основанная на принципе доминанты и компараторной функции гиппокампа // *ЖВНД.* – 2004. – т. 54, № 1. – с. 10–29.
34. *Hebb D. O.* The Organization of behavior. – New York: Wiley, 1949.
35. *Иваницкий А. М.* Физиология мозга о происхождении субъективного мира человека // *Журн. высш. нерв. деят.* – 1999. – т. 49, № 5. – с. 707–713.
36. *Барабанчиков В. А.* Системогенез чувственного восприятия. – М.: Изд-во «Институт практической психологии», 2000. – 464 с.
37. *Beck J.* Textural segmentation, second-order statistics, and textural elements // *Biological Cybernetics.* – 1983, v. 48. – pp. 125–137.
38. *Sagi D., Julesz B.* “Where” and “what” in vision // *Science.* – 1985, v. 228. – pp. 1217–1219.
39. *Наатанен Р.* Внимание и функции мозга. – М.: МГУ, 1998. – 559 с.
40. *Cotterill R. M. J.* Autism, intelligence and consciousness // *Biologiske Skrifter Danske Videnskabernes Selskab.* – 1994, v. 45. – pp. 1–93.
41. *Leonards U., Singer W., Fahle M.* The influence of temporal phase differences on texture segmentation // *Vision Res.* – 1996, v. 36. – pp. 2689–2697.
42. *Roelfsema P. R., Engel A. K., Konig P., Singer W.* The role of neuronal synchronization in response selection: A biologically plausible theory of structured representations in the visual cortex // *Massachusetts Institute of Technology, Journal of Cognitive Neuroscience.* – 1996. – v. 8, No. 6. – pp. 603–625.
43. *Воронков Г. С.* Механизм решения задач в элементарном сенсорнуме: нейронные механизмы опознания и сенсорного обучения // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение.* – 2004, № 2–3. – с. 92–100.
44. *Кропотов Ю. Д.* Система селекции действий мозга как фильтр высокого уровня // *Оптический журнал.* – 1999. – т. 66, № 10. – с. 55–61.
45. *Величковский Б. М.* Современная психология. – М.: МГУ, 1982. – 336 с.

46. *Bonato P., Cataliotti J.* The effects of figure/ground, perceived area, and target saliency on the luminosity threshold // *Perception and Psychophysics*. – 2000, v. 62. – pp. 341–349.
47. *Шифман Х. Р.* Ощущение и восприятие. – С.-Пб.: Питер Принт, 2003. – 924 с.
48. *Трейсман Э.* Объекты и их свойства в зрительном восприятии человека // *В мире науки*. – 1987, № 1. – с. 68–78.
49. *Treisman A.* The binding problem // *Current Opin. in Neurobiol.* – 1996. – v. 6. – pp. 171–178.
50. *Шевелев И. А., Каменкович В. М., Лазарев Н. А., Новикова Р. В., Тихомиров А. С., Шараев Г. А.* Психофизиологическое и нейрофизиологическое исследование опознания неполных изображений // *Сенсорные системы*. – 2003. – т. 17, № 4. – с. 339–346.
51. *Ярошевский М. Г.* Наука о поведении: Русский путь. – Воронеж: Институт практической психологии, 1996.

Владимир Яковлевич СЕРГИН, ведущий научный сотрудник Института математических проблем биологии РАН, доктор физико-математических наук, заслуженный деятель науки РФ. Область научных интересов: психофизиологические механизмы и системная организация восприятия, сознания, рассудочного и образного мышления, интуиции. Является автором более 80 научных работ, в том числе 2 монографий и 3 изобретений.