

28.9

И 39

Новое  
в жизни,  
науке,  
технике

Подписная  
научно -  
популярная  
серия

Г.Р.Иваницкий  
**НЕЙРО-  
ИНФОРМАТИКА  
И МОЗГ**

6'91



ФИЗИКА

ЗНАНИЕ



13  
16 8

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ

## ФИЗИКА

6/1991

Издается ежемесячно с 1967 г.

Г. Р. Иваницкий

## НЕЙРОИНФОРМАТИКА И МОЗГ



117863

МОСКВА ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ» 1991



ИВАНИЦКИЙ Генрих Романович — член-корреспондент АН СССР, лауреат Ленинской и Государственной премий, автор более 150 статей, брошюр, изобретений и монографий по различным вопросам биофизики. Основная область интересов в последние годы — нелинейная динамика сложных систем. Руководит лабораторией Института теоретической и экспериментальной биофизики АН СССР.

Редактор К. А. КУТУЗОВА



## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Эволюция взглядов на работу мозга	4
Причины формирования новой программы исследования мозга	15
Мозг мыслит не символами	22
Фильтр, предсказывающий будущее	39
Заключение	61
Литература	63

Иваницкий Г. Р.

И 19 Нейроинформатика и мозг.—М.: Знание, 1991.— 64 с.— (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Физика»; № 6).

ISBN 5-07-001754-3

40 к.

Рассмотрены причины формирования новой государственной научно-исследовательской программы «Нейроинформатика и мозг». Рассказано об основных идеях программы, заложенных в новый этап фундаментальных исследований мозга. Указана практическая значимость этих работ. Дана эволюция взглядов на работу мозга, которая привела научную общественность к необходимости создания специальных разделов научной программы на период 1990—2000 гг. Изложена идея создания фильтра, предсказывающего будущее.

1903010000

ББК 28.071

ISBN 5-07-001754-3

© Иваницкий Г. Р., 1991 г

Посвящается памяти  
профессора Б. Н. ВЕПРИНЦЕВА

## ПРЕДИСЛОВИЕ

На период с 1991 по 2000 г. принята новая государственная научно-исследовательская программа «Нейроинформатика и мозг». Однако, прежде чем рассмотреть причины ее формирования, заложенные в нее направления исследования и их практическую значимость, необходим экскурс в эволюцию наук о мозге.

В ограниченной объеме брошюре трудно рассказать о всей науке о мозге, тем более дать исчерпывающий перечень главных экспериментальных результатов, полученных в последние годы. Мы и не ставим перед собой такой задачи. Наша цель — показать, что попытки сложить из твердо установленных фактов единую картину деятельности мозга чем-то напоминают мифотворчество древних мудрецов. Каждое новое поколение специалистов в значительной степени разрушает старую, привычную для предыдущих поколений картину, разбирая ее на фрагменты, с тем чтобы с учетом новых экспериментальных данных собрать другую.

Накопление фактического материала во второй половине нашего века в науках о мозге подготовило фундамент если не для создания окончательной версии ответа на вопрос: «Как мы мыслим?», то, по крайней мере, для того, чтобы попытаться построить с учетом достижений физики, биофизики, биохимии и техники новую концепцию работы мозга. В этом и заключается одна из главных причин создания научной программы «Нейроинформатика и мозг». Хотя существуют и другие, более прозаические, диктуемые практическими потребностями причины, о которых мы расскажем в следующих разделах брошюры.



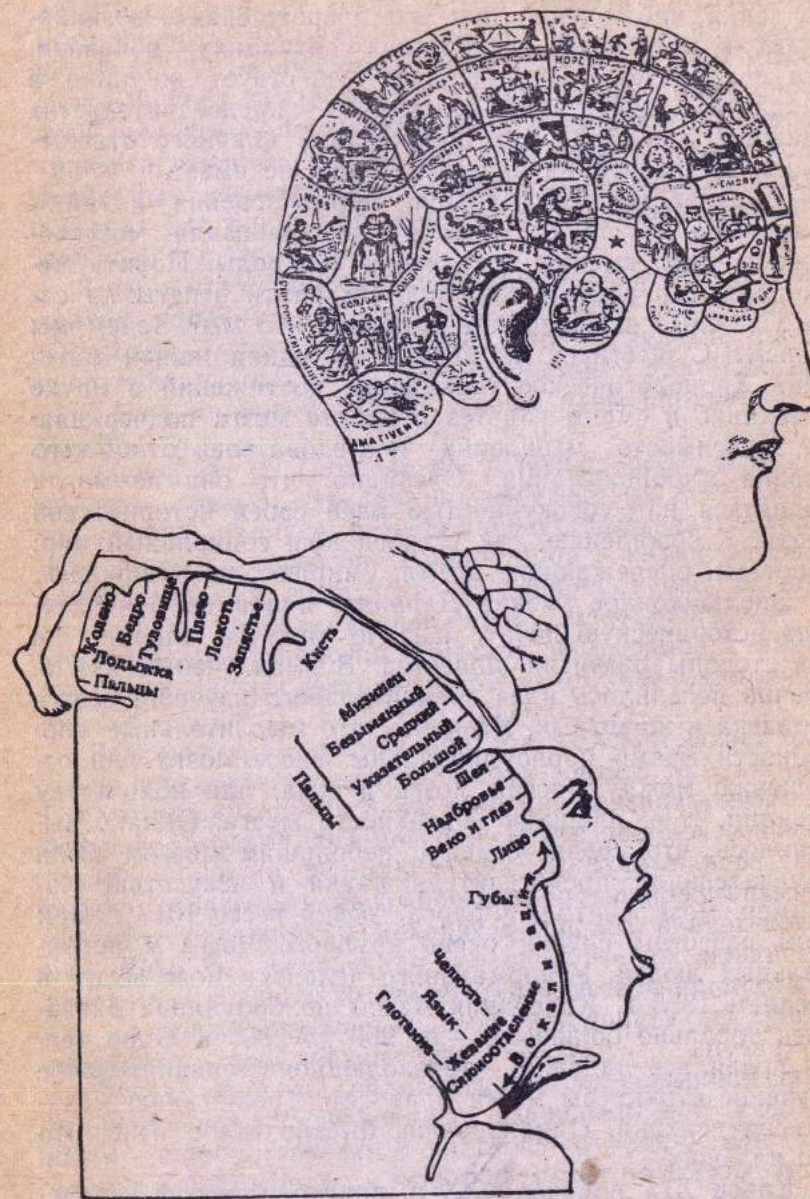
## ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ НА РАБОТУ МОЗГА

В IV в. до н. э. Аристотель писал, что в мозгу нет крови и что сердце является источником нервного контроля и вместилищем души. Греческий мыслитель Теофраст (или в некоторых изданиях Теофраст), друг и последователь великого Аристотеля, выделил и описал 30 психологических портретов людей. Церковь, забрав власть над душой, утвердила мысль, что душа временно связана с бранным телом, в том числе и с мозгом, и неподвластна прямому исследованию. Позднее мыслители в привычных для своей эпохи терминах формулировали новые мифы.

Возникали ситуации, когда мифы, модифицируясь, распадались на фрагменты; затем из них собирались другие, с новой идеей. Быстрое их распространение говорило не об их достоверности, а лишь о том, что была подготовлена социальная почва для их возникновения. Они попадали на соответствующий их содержанию цикл в цепи социально-исторического развития. Были мифы, опережавшие время, а потому не воспринимаемые общественностью. Они умирали, не оставляя следа, или оставляли незаметный след в виде отрывочных публикаций. В науке движущим фактором являлась социальная предыстория, а критерием отбора — существующее состояние общественного сознания.

Планомерные анатомические исследования мозга проводились еще в XVI в. В зарисовках структур мозга участвовали крупные художники своего времени, например ученики Тициана, которые в качестве натурь использовали вскрытые черепа голов казненных преступников.

Попытки совместить функции отдельных частей мозга с их структурой имеют многолетнюю историю (рис. 1). На рисунке вверху показана картина представительства различных черт личности (жадности, обжорства, религиозности, способности к ремеслам и т. д.), как она представлялась исследователям XVIII в. Долгое время в науках о мозге существовала область, именуемая френологией (от греческого «френос» — душа, ум, сердце). Это учение о локализации черт личности в различных участках мозга, якобы различных путем изменения рельефа поверхности черепа. Дальнейшие исследо-



**Рис. 1.** Распределение функций в мозгу человека: наверху — френологическая карта представительства функций; внизу — карта представительства в коре мозга двигательных функций. Стимуляция этих зон коры приводит к сокращению соответствующих групп мышц



вания с помощью электростимуляции зон мозга и накопления наблюдений при его повреждениях, возникающих в различных трагических ситуациях, показали, что локализация действительно существует, но лишь в варианте двигательного-сенсорного представительства (нижний рисунок). Эта локализация никакого отношения к конфигурации рельефа черепа не имеет.

Привлекательность задачи проникновения в тайны мышления состояла в том, что все понимали: мозг человека — это высшее достижение Природы. Понять механизмы его работы означало бы найти ответы на самые важные философские вопросы: кто мы? Зачем мы живем? Существует ли цель в эволюции живой материи? Хронологическое совпадение достижений в науке и технике и смены гипотез о работе мозга подчеркивало зависимость мышления исследователей от общего уровня миропонимания. Очевидно, что они не могли подняться над совокупностью идей своей исторической эпохи. К сожалению, так устроен наш социальный мир: гипотезы, опережающие время, умирают, не родившись.

Эволюционное учение Дарвина, попав на благодатную историческую почву, оказало могучее влияние на все стороны развития общества. В умах ученых XIX в. прочно поселилась идея сравнительного изучения мозга человека и животных. Казалось, что мыслительные способности прямо пропорциональны массе мозга или отношению между массой мозга и тела, или количеству извилин, т. е. площади поверхности мозга. Однако выяснилось, что среди людей с небольшим мозгом были замечательные представители науки и искусства. Например, мозг Анатоля Франса весил всего 1017 г, при этом известны случаи очень крупного мозга у ненормальных людей. У нормального человека мозг весит в среднем 1375 г. Колебания массы по популяции оказались довольно большими — от 900 до 2800 г. Одно время появилась надежда, что эволюционно-сравнительное изучение структуры мозга приведет к пониманию механизмов психики. Однако очень быстро стало ясно, что это иллюзия.

Конец XIX и начало XX в. принесли другие увлечения. С легкой руки З. Фрейда, его предшественников и последователей начали предлагать многочисленные психоаналитические методы, с помощью которых стремились проникнуть во внутренний мир человека. Это бы-

ли психологические тесты, в том числе и с использованием гипноза, попытки толкования оговорок или сновидений [1]. Оговорка представляет собою как бы моментальный срез психического процесса. При этом считалось, что слово отражает образ, соединенный ассоциативными связями с другими образами. Однако более детальные исследования показали, что методы психоанализа для понимания работы мозга также оказались малоперспективными.

Позже стали широко использовать аналогии с поведением коллективных животных. Такие исследования позволяли описывать сравнительное поведение людей в группах на основе их взаимодействий. Это было возрождение на новой основе старых идей Гиппократ и Феофраста.

Учение И. П. Павлова об условных рефлексах продолжало идею Р. Декарта о рефлекторной дуге. Постулировалось наличие у людей трех групп элементов — устройство восприятия (рецепторов), коммутатора и исполнительных устройств. В данном случае под коммутатором подразумевался мозг. Исследователям он представлялся аналогом большой телефонной станции, замыкающей абоненты-рецепторы на абоненты-исполнители.

Все живые организмы обладают врожденными формами поведения, реализующимися в ходе их развития. Стереотипность ответов на внешние раздражители наиболее характерна для низших организмов — насекомых, рептилий и птиц. У млекопитающих, в том числе у человека, поведение определяется не столько инстинктами, сколько обучением, и находится под контролем сознания. Хотя и у человека в основе обучения лежат стереотипы поведения, имеющие генетическое происхождение (подражательный, игровой, миграционный, сексуальный, стадный инстинкты).

Однако попытка объяснить все многообразие поведения человека безусловными (врожденными) и условными (приобретаемыми в процессе обучения) рефлексами путем замыкания соответствующих «реле» в мозгу также оказалась неудачной. Этот подход ограничивался лишь наблюдением внешних реакций человека и ничего не мог сообщить нам о таких процессах, как эмоции, внимание, сознание, озарение и мотивы поведения. Хотя идея рефлексов как носителей мышления оказала



влияние на стремление к изучению материальной основы мозга, но запутала проблему объединения психики со структурой мозга. Тем не менее поиск «реле» привел к тому, что была выяснена клеточная структура мозга.

Когда стало ясно, что мозг состоит из отдельных клеток-нейронов, соединенных между собой отростками, внимание сосредоточили на вопросе: как возбуждение передается от нейрона к нейрону — электрическим или химическим путем? К середине 20-х гг. нашего века большинство ученых были готовы принять точку зрения, что возбуждение мышц, регуляция сердечного ритма и других периферийных органов осуществляются с помощью химических сигналов, возникающих в нервах.

Было обнаружено, что отростки нервных клеток — аксоны заканчиваются древовидными разветвлениями-дендритами с концевыми луковицами, которые назвали синапсами. Выяснили, что существуют два вида синаптических окончаний: возбуждающие и тормозящие. Из синапса выделяются микропорции химических веществ — медиаторов, которые изменяют проницаемость каналов внешней мембраны тела нейрона для различных ионов ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$  и др.). Например, для акта возбуждения характерен вход ионов  $Na^+$  внутрь тела нейрона и выход ионов  $K^+$  наружу. При этом напряжение на мембране изменяется приблизительно на  $80 \div 100$  мВ (от  $-60$  до  $+40$  мВ). После возбуждения наступает фаза отсутствия чувствительности (рефрактерность), когда нейрон должен восстановить свою активность, например, закачать внутрь ионы  $K^+$  и выбросить избыток ионов  $Na^+$ . После этого наступает третья фаза — покой, когда нейрон вновь готов принять возбуждающий его химический сигнал и ответить на него встречными ионными потоками возбуждения и изменением электрического заряда на мембране.

Казалось бы, логика работы нейрона очень проста — это трюнный логический элемент, одно его состояние — это возбуждение, другое — рефрактерность, третье — покой. Однако эта простота оказалась мнимой. Мембрану нейрона прошивают сотни белков-рецепторов, которые влияют на конечный акт движения ионов через каналы мембраны. Эти белки чувствительны к многочисленным химическим соединениям, которые для них являются информационными сигналами. Возникли новые проблемы: как белки распознают подходящие к ним мо-

лекулы? Мыслит ли отдельный нейрон? Как его внутреннее состояние влияет на взаимодействия с соседними нейронами? На нервы и мышцы стали непосредственно воздействовать растительными экстрактами и синтетическими препаратами. Картина становилась все более сложной, но понимание процессов мышления не появлялось.

Для того чтобы связать условный и безусловный раздражители, животное должно запомнить их последовательность во времени. Механизмы памяти разнообразны и прослеживаются на разных структурных уровнях от молекул до целостных органов, в том числе и на отдельных нейронах. Например, у кролика при выработке условных рефлексов были обнаружены изменения в нейронах одной из структур мозга. При временном совпадении сигналов условного и безусловного раздражителя снижался порог для токов ионов калия через мембраны этих клеток. Как уже отмечалось, обычно калий поддерживает определенный потенциал на клеточной мембране. Этот пороговый заряд препятствует возбуждению клетки. При его снижении возникновение импульсов возбуждения облегчается. Уменьшение порога для калиевого тока, изменяющего соотношение электрических сигналов, длится много дней. Такие механизмы были обнаружены на нервных клетках морской улитки *Hermisenda*. Эти исследования натолкнули на мысль, что в основе рефлексов может лежать определенный тип функционирования мембранных каналов с длительным последствием. Механизм локализации изменений, связанных с обучением, в нейронах стали считать одной из ключевых проблем мышления. Возможный механизм таких процессов показан на схеме (рис. 2) [2]. Исследователи полагали, что эти изменения возникают в воспринимающих участках нейронов, когда поступление в них входных сигналов, вызванных условным раздражителем, связано во времени с поступлением на соседний участок сигналов, вызванных безусловным раздражителем (1). Сигнал, возникший в результате взаимодействия двух участков, передается в тело нейрона (2), который отвечает выработкой сигналов, возвращающихся к месту взаимодействия и фиксирующих его, превращая связь во «впянную» (3). Особая роль в этих процессах отводилась так называемой протеинкиназе С, которая в результате определенной



последовательности физико-химических процессов перемещается из цитоплазмы нейрона к его мембране, что приводит к понижению порогов калиевых каналов. Однако появились и другие альтернативные гипотезы механизма запоминания.

Развивающийся мозг пытались сравнить с системой автодорог, где какие-то пути оказываются заброшенными, а те дороги, которыми часто пользуются, расширяются и при необходимости возникают дополнительные параллельные полосы движения. Каким же способом мозг мог формировать подобную структуру?

На рис. 3 показана одна из предложенных схем самоорганизации мозга [3]. Если аксон, отросток соседнего нейрона, подходящий к дендритному окончанию, неактивен, то внутри дендрита разыгрывается следующая цепь событий (рис. 3, а). Нейромедиатор 1 (например, норадреналин), контактируя с рецептором, активирует фермент аденилатциклазу (2). Та, в свою очередь, превращает аденозинтрифосфат (АТФ) (3) в циклический аденозинмонофосфат (цАМФ) (4). цАМФ активирует другой фермент — киназу (5), которая пере-

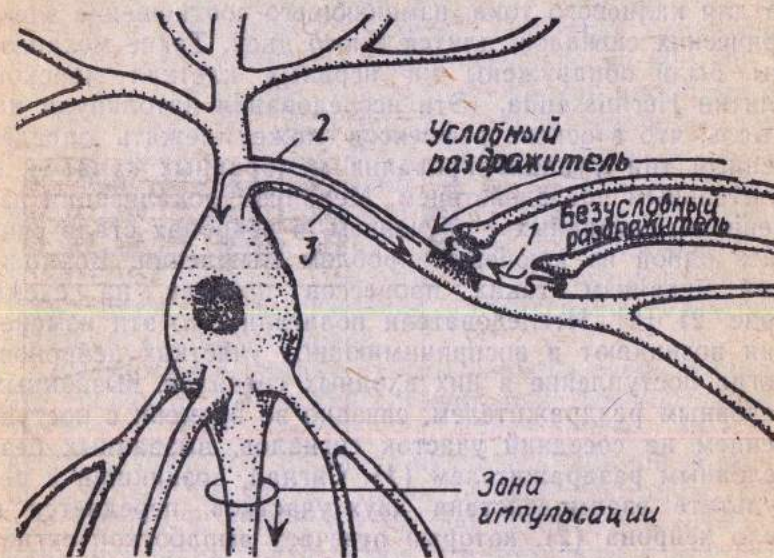


Рис. 2. Схема предполагаемого механизма выработки условного рефлекса нейроном в результате совпадения безусловного и условного раздражителей. Последовательность событий обозначена цифрами

водит определенный белок, например, МАР-2 (6) из активной формы в неактивную (7) путем присоединения к нему фосфатной группы. Такие фосфорилированные белки меняют свою пространственную структуру. Белок МАР-2 относится к цитоскелетным белкам, называемым так потому, что они служат элементами при сборке скелета клетки из полимеризующихся белков, образующих цилиндрические структуры — нейрофиламенты и микротрубочки. Если этот белок фосфорилирован, то сборка осуществляться не может. Были основания считать, что такая сборка лежит в основе ветвления аксонов и дендритов, обеспечивающих связь между нейронами при организации нервных сетей. Возможно, что стимуляция прокладки нервного пути связана с дефосфорилированием МАР-2, когда он вновь становится активным и сборка скелета ветвей клетки продолжается (рис. 3, б). Таким образом, предположили, что

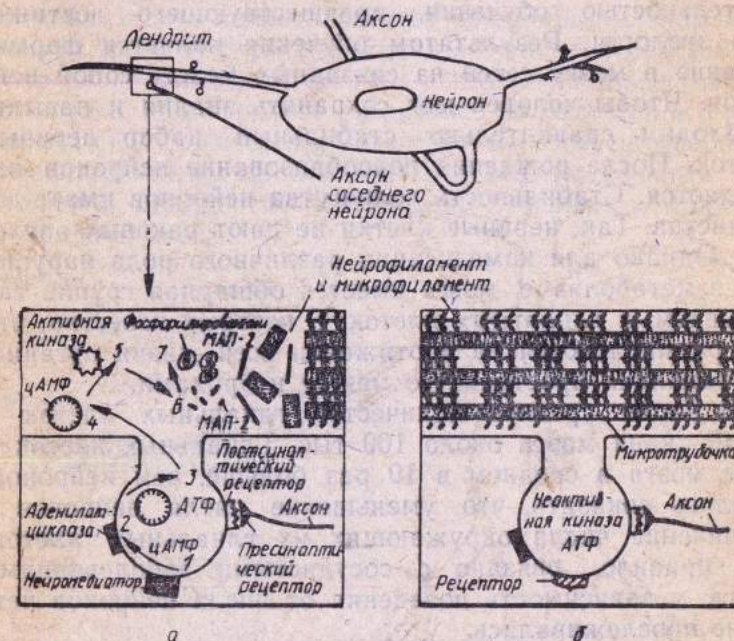


Рис. 3. Схема возможного механизма влияния отсутствия возбуждения нейрона на остановку сборки его структур, реализующих коммуникацию возбуждающих сигналов. Рисунки а и б (внизу) являются увеличенным изображением зоны, отмеченной рамкой на верхней схеме: а — последовательность операций, останавливающих сборку; б — рисунок структуры, самособирающейся в случае отсутствия процесса, блокирующего сборку



сам акт возбуждения, снимающий блокировку нейромедиатора, способствует росту сети активного нейрона.

Предпринимались попытки связать количество нейронов в различных формациях мозга человека со способностями человека. К этим исследованиям оказался причастным и автор [4]. Моя кандидатская диссертация, выполненная в начале 60-х гг. в Институте биологической физики АН СССР и Научно-исследовательском институте нейрохирургии имени Н. Бурденко, так и называлась — «Разработка методов автоматического подсчета и измерения клеток мозга». У человека после формирования мозга число нейронов составляет порядка  $10^9$ — $10^{12}$ . В процессе внутриутробного развития число нервных клеток в мозгу увеличивается со скоростью 250 тыс. в 1 мин. Приматы отличаются от многих животных не только продолжительностью жизни, но и длительностью обучения, предшествующего достижению зрелости. Результатом обучения является формирование в мозгу сетей из связанных между собой нейронов. Чтобы человек мог сохранять знания и навыки, необходим сравнительно стабильный набор нервных клеток. После рождения новообразование нейронов замедляется. Стабильность количества нейронов имеет достоинства. Так, нервные клетки не дают раковых опухолей. Однако для компенсации различного рода нарушений в метаболизме мозга имеется обширная группа так называемых глиальных клеток, о которых известно, что они размножаются на протяжении всей жизни организма, заполняя пространство между нейронами.

В норме среднее количество глиальных клеток в  $1 \text{ мм}^3$  ткани мозга около 100 тыс. Глиальных клеток в коре мозга в среднем в 10 раз больше, чем нейронов. Удалось показать, что уменьшение числа нейронов и увеличение числа окружающих их глиальных клеток, как правило, связано с сосудистыми заболеваниями мозга, а зависимость поведения от числа нейронов четко не прослеживалась.

Казалось, что много для понимания работы мозга может дать метод изучения его электрической активности и электростимуляции. Регистрация электрической активности мозга с помощью накладываемых на голову пациента электродов имеет полувековую историю. Описаны пять основных групп ритмов (рис. 4) в электроэн-

цефалограмме (ЭЭГ) человека:  $\delta$ =(от 0,5 до 3,5 Гц),  $\theta$ =(от 4 до 7 Гц),  $\alpha$ =(от 8 до 13 Гц),  $\beta$ =(от 14 до 30 Гц) и сверхнизкие ритмы (периодичностью от минут до часов) [5]. В деталях их рисунок индивидуален и не совпадает даже у однояйцовых близнецов.

Ритмы мозга плода — это нерегулярные  $\delta$ -волны. Любопытно, что рисунок их похож на волны эпилептического припадка. В течение нескольких первых месяцев после рождения для ребенка также характерен нерегулярный  $\delta$ -ритм.  $\theta$ -активность доминирует в записях у детей в возрасте от 2 до 5 лет, затем в возрасте 5—6 лет ритм становится примерно равным  $\alpha$ -активности.  $\alpha$ -активность проявляется у детей старше 5 лет, но становится слабой и прерывистой к 10 годам. Есть основания считать  $\delta$ -ритмы признаком эмоциональной сферы человека, его настроения.

Иногда записи с отсутствием  $\alpha$ -ритма встречаются у взрослых. Это свидетельствует об эмоциональном восприятии мира.  $\theta$ -ритмы выражены и распространены на значительную область мозга у невыдержанных взрослых людей. Устойчивые  $\alpha$ -ритмы больше характерны для людей с логическим мышлением, которые оперируют абстрактными понятиями. Все эти интересные наблюдения, однако, не приблизили ученых к пониманию работы мозга.

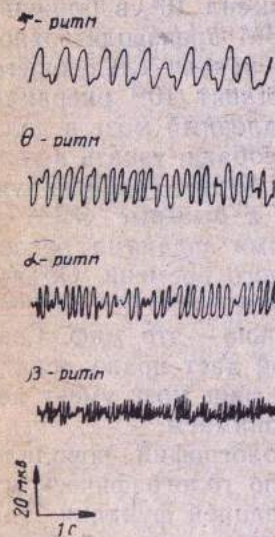


Рис. 4. Основные электрические ритмы мозга, определяемые с использованием метода электроэнцефалографии



Вживление в мозг электродов и электрическое раздражение отдельных его участков давали возможность искусственно вызывать психические реакции организма. Например, крыса с электродами, вживленными в центр удовольствия, нажимала и отпускала педаль, включающую электрический стимул, в течение суток в среднем с частотой 2000 раз в час, отказываясь при этом даже от пищи. Подобные опыты с одинаковым успехом были повторены на кошках, обезьянах, дельфинах и даже людях. Однако вопрос о том, как человек мыслит, вновь остался без ответа.

К середине века появились технические электронные новинки. Общество вступило в эпоху компьютеризации. Рождался новый миф. Научные журналы запестрели заголовками: «Мозг как вычислительная машина», «Может ли машина мыслить?», «Вычислительные машины и человеческий разум» и т. д. Появилась цель — создать машины, способные воспроизвести или объяснить кое-что из того, что может делать мозг.

Длительность импульса возбуждения — около 3 мс плюс рефрактерный хвост, приблизительно в 2 раза превосходящий по длине сам импульс. Таким образом, быстроедействие «вычислительного устройства» на нейронах должно было составлять не более  $10^2$  операций в секунду, тогда как у существующих сегодня микропроцессоров этот показатель уже превысил  $10^6$ , в ближайшее время ожидается создание ЭВМ производительностью выше  $10^6$ , а по прогнозам к началу следующего столетия быстроедействие ЭВМ составит  $10^{12}$  операций в секунду. И тем не менее наш медленный мозг в доли секунды может отличить кошку от собаки, узнать в толпе знакомого, распознать любую букву, написанную разными почерками и шрифтами, а быстрые ЭВМ с трудом справляются с примитивными задачами распознавания, затрачивая часы машинного времени. Объяснение этого феномена лишь параллельностью логических операций в мозгу несостоятельно — это миф. Создание ЭВМ с параллельной логикой дает право делать такое утверждение. Следовательно, наш мозг умеет делать еще нечто, чего пока мы не понимаем.

Открытие и распространение голографии породило версию о том, что мозг работает по голографическому алгоритму с относительной локализацией функции. Так же, как по осколку голограммы можно, хотя и с мень-

шей яркостью, восстановить оптический образ, фрагмент мозга уже содержит функцию целого. Другими словами, мозг мыслит потому, что таким свойством обладает каждая его клетка. Автоволновая концепция второй половины XX в. породила новую идею. Работу мозга попытались объяснить в терминах столкновения автоволн в распределенных возбудимых средах. К этой идее мы еще вернемся. Этот взгляд возродил старый миф о вибрирующей среде, но со свойствами, отличными от ранее постулируемых.

Однако современная система взглядов на механизмы нашего мышления продолжала нести груз прошлого. Чтобы разобраться в экспериментальных результатах, накопленных в настоящем, не говоря уже о прогнозе будущих, нужны новые пути.

### ПРИЧИНЫ ФОРМИРОВАНИЯ НОВОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЗГА

В начале 1989 г. сессия конгресса США приняла «Объединенную резолюцию сената и палаты представителей США по объявлению «Десятилетия мозга» с 1 января 1990 г.».

Какие причины побудили конгресс США принять столь необычную резолюцию? Очевидно, что если бы американские ученые попросили у правительства несколько миллиардов долларов на фундаментальные науки о мозге, то скорее всего получили бы отказ. Налогоплательщики вряд ли согласились бы, чтобы кто-то «удовлетворял свое любопытство» за их счет. Поэтому в основу этой резолюции (и не без оснований) легли сугубо практические причины: к сожалению, наш мозг может изменяться, когда мы, не понимая последствий, активно вмешиваемся в природные процессы. Зловещая роль влияния индустриализации на состояние окружающей среды затронула нервную систему человека.

Одна из наиболее известных в научно-фантастической литературе фабул такова: чужеродные паразиты внедряются в человека, заставляют его выполнять свои приказания, размножаются в нем и переходят в другую столь же беспомощную жертву. Однако представление



о том, что паразит может изменять поведение организма, — совсем не фантастика.

Давно известно, что паразиты изменяют поведение, например, делают животное более уязвимым для нападения со стороны хищника, который должен в соответствии с жизненным циклом паразита стать следующим его хозяином. Некоторые паразиты влияют на поведение своих промежуточных хозяев, проникая в их центральную нервную систему. Существует, например, такая болезнь вертячка, при которой больные жвачные животные, чаще всего овцы, ходят, пошатываясь, кругами и в конце концов отбиваются от стада. Вертячка вызывается проникновением в головной и спинной мозг животного личинки собачьего ленточного червя *Taenia multiceps*. Следующим хозяином гельминта становятся волки и дикие собаки, которые охотятся за отделившимися от стада животными. Паразиты не индицируют каких-то новых типов поведения, а просто вызывают существующие реакции, но в противоестественных для выживания животного ситуациях.

Возможно, что рост психозов и самоубийств в наше время также определяется мутацией вирусов и других паразитов человека, воздействующих на нашу психику [6]. В качестве примера психического расстройства человека можно привести, например, так называемый невроз навязчивости. Им страдают до 2% населения США. Неврозы навязчивости проявляются в непреодолимом стремлении человека мыться, проверять двери, газовые и электроприборы, все время что-то подсчитывать, в назойливых мыслях об опасности и т. д. Отличие навязчивости от нормы состоит в том, что эти желания завладевают всем существом больного, нарушая его привычную жизнь. Люди с неврозом навязчивости отдают себе отчет в абсурдности своего поведения, но не могут подавить в себе эти желания. Избавиться от таких неврозов медикаментозными методами или лечением психотерапией сложно. Это заболевание имеет хронический и рецидивирующий характер. У 50% больных симптомы наблюдаются очень долго (до 20 лет) после завершения курса лечения.

Специалисты считают, что в основе заболевания лежит спонтанная гипертрофия генетически запрограммированных стереотипов поведения, например, связанных с грумингом (у животных это счесывание, чистка шер-

сти или оперения) или территориальностью (постройкой жилища и охраной места обитания). Это психическое расстройство, как и многие другие, прогрессирует в результате осложнений после инфекционных заболеваний. Этиология невроза навязчивости, как, впрочем, и ряда других психических расстройств, до конца не выяснена, хотя поражаемые структуры мозга известны (рис. 5): за эмоциональную окраску инстинктов, «впаянных» генетически в поведение человека, отвечает кора головного мозга, за сами инстинкты — базальные ганглии, находящиеся под корой, например, скорлупа, бледный шар или хвостатое ядро. Эти структуры соединяются с лобными долями коры несколькими нервными путями. Один из них включает волокна, идущие из поясной извилины к коре мозга (на схеме эта область зачернена). Считают, что симптомы невроза навязчивости обусловлены нарушением в этой нервной цепи. Таким образом, ослабление влияния коры на подкорку дает возможность инстинктам завладеть нашим «Я» [7].

Особенно опасны для психики человека отклонения в химическом балансе окружающей среды. Например, установлено, что если люди питаются плодами земли, в которой мало йода, среди них распространяется так на-

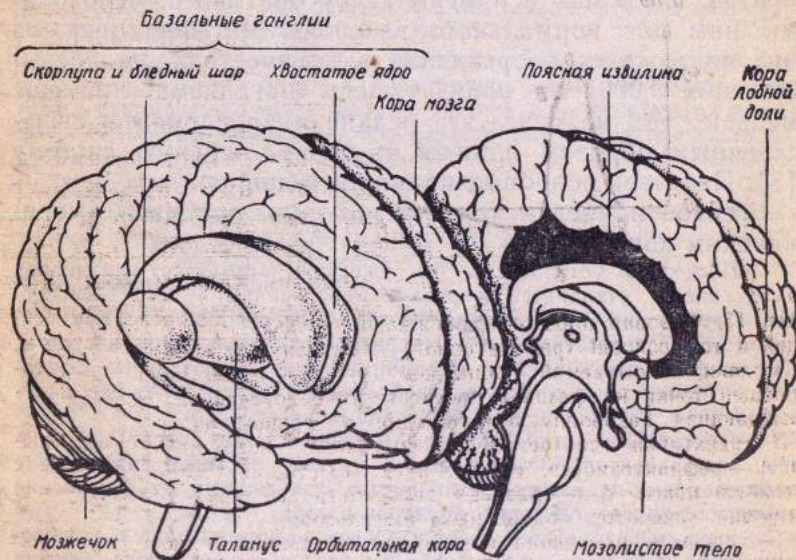


Рис. 5. Структуры мозга, поражаемые при неврозах навязчивости



зываемый эндемический кретинизм, который с трудом поддается лечению даже путем йодизации пищи или с помощью гормона щитовидной железы. Для больных характерен бессмысленный взгляд и дергающиеся движения. Мозг весьма чувствителен к недостатку или к избытку меди. Недостаточность ферментов в мозгу и потеря организмом дофамина (он является одним из веществ, обеспечивающих передачу нервных импульсов) характерна для болезни Паркинсона (дрожание конечностей). Медь важна в процессах окислительного метаболизма в мозгу.

Марганец издавна считался ядом. Передозировка его в пище может привести к психозу, известному как марганцевое безумие, при котором имеют место галлюцинации и непроизвольный смех, а в конце концов развиваются нарушения речи, походки и появляется тремор. В то же время марганец в дозе около 1 мг в день необходим. У крыс одним из признаков недостаточности марганца является потеря ориентации в лабиринте.

Список видов влияния микроэлементов на нервную систему очень обширен, но пока плохо изучен. Дрожательные параличи вызываются, например, ртутью. Кадмий, замещая цинк, приводит к дефектному развитию эмбриона. Короче говоря, 25 из 83 долгоживущих элементов, входящих в номенклатуру биотканей, необходимы нам для нормального развития. Четырнадцать из них содержатся в организме в количествах, не превышающих 0,0001 от общей массы организма или еще меньше. Тем не менее эти редкие микроэлементы существенным образом влияют на нашу нервную систему [8]. Перечень подобных примеров обширен.

Теперь приведем текст резолюции, принятой американским конгрессом:

«Поскольку установлено, что ежегодно пятьдесят миллионов американцев становятся жертвами заболеваний и нетрудоспособности вследствие повреждения мозга, включающих основные психические, наследственные и дегенеративные заболевания, инсульты, нарушения в связи с наркоманиями, влияние пренатальных факторов, нейротоксинов в окружающей среде и травм, а также нарушений речи, слуха и других когнитивных расстройств;

— поскольку установлено, что общая сумма затрат на лечение, восстановительную терапию и другие расходы, связанные с заболеваниями и нетрудоспособностью, зависящими от поражения мозга, составляет 305 млрд. долларов в год;

— поскольку население должно быть информировано о волнующих достижениях в исследовании мозга и о возможности лечения заболеваний, поражающих мозг;

— поскольку технологическая революция, происходящая в области наук о мозге, приведшая к разработке таких методов, как позитронная эмиссионная томография и создание изображений посредством магнитного резонанса, позволяет клиницистам наблюдать мозг в тонких деталях неинвазивными методами, определять системы мозга, затрагиваемые при специфических видах нарушений, исследовать зависимость поведения от нейропептидов и подойти к пониманию сложных структур, обеспечивающих память;

— поскольку научная информация о мозге нарастает с колоссальной скоростью, а область компьютерной и информационной науки достигла уровня развития, достаточного для того, чтобы анализировать данные нейронаук с максимальной пользой как для исследований в области фундаментальных наук, так и для клиницистов, изучающих мозг в норме и патологии;

— поскольку достижения математики, физики, вычислительной техники и методов изображения мозга позволили начать важную работу по отображению функций мозга в норме и патологии, моделированию нейронных сетей и их динамических взаимодействий;

— поскольку понимание реальной работы нервной системы все еще требует введения новых технологических методов, позволяющих расшифровку того, как отдельные нейроны путем коллективного действия обеспечивают интеллект человека;

— поскольку фундаментальные открытия на молекулярном и клеточном уровне организации мозга закладывают основу понимания нейрофизиологических механизмов мыслительной деятельности человека и его эмоций;

— поскольку молекулярная биология и молекулярная генетика создали эффективные стратегии в предупреждении некоторых форм тяжелой умственной отсталости и участвуют в создании многообещающих подходов к исследованию наследственных неврологических заболеваний, таких, как болезнь Гентингтона, и психических нарушений, например аффективных расстройств;

— поскольку создание карт биохимических связей, обеспечиваемых нейротрансмиттерами и нейромодуляторами, позволит разработать фармакологические методы лечения с минимальными побочными эффектами, исправляющие дискретные нейрохимические дефекты, связанные с такими заболеваниями, как болезнь Паркинсона, шизофрения и болезнь Альцгеймера;

— поскольку статистика неврологических, психиатрических, психологических и когнитивных нарушений и форм нетрудоспособности у лиц пожилого возраста будет нарастать в связи с увеличением числа таких лиц;

— поскольку исследования мозга и центральной нервной системы имеют важное значение не только для лечения неврологических, психиатрических, психологических и когнитивных расстройств, но и для лечения бесплодия, сердечно-сосудистых заболеваний, инфекционных и паразитарных заболеваний, нарушений развития и иммунных дефектов, а также для понимания факторов поведения, приводящих к гибели людей в нашем государстве;

— поскольку центральная нервная и иммунная системы являются сигнальными системами, обслуживающими весь организм, между которыми существуют непосредственные взаимодействия, и изучение модулирующих влияний каждой из этих систем на другую повысит наше понимание столь разных заболеваний, как ос-



новые психические расстройства, синдром приобретенного иммунодефицита и аутоиммунные заболевания;

— поскольку недавние открытия привели к фундаментальному пониманию причин наркомании, влияний наркотиков на мозг, вызывающих зависимость от них, и разрушений мозга некоторыми из этих веществ;

— поскольку исследования мозга помогут создать новые формы лечения, снимающие зависимость от наркотических веществ, эффекты их действия на мозг, ослабляющие их разрушительное действие на психику детей, являющихся невинными жертвами наркомании;

— поскольку лечение лиц с черепно-мозговой травмой, задержками развития, нарушениями речи, слуха и других когнитивных функций становится более доступным и эффективным;

— поскольку исследование мозга требует мультидисциплинарного подхода с участием ученых из столь различных областей, как физиология, биохимия, психология, психиатрия, молекулярная биология, анатомия, медицина, генетика, и многих других, работающих вместе, во имя общей цели лучшего понимания структуры мозга и его влияния на развитие, здоровье и поведение;

— поскольку за последние двадцать пять лет Нобелевские премии по медицине или физиологии были присуждены пятнадцати представителям нейронаук, что подчеркивает волнующее значение и продуктивность исследований мозга и центральной нервной системы, а также их возможностей в оздоровлении человечества;

— поскольку народ нашей страны должен быть заинтересован в исследованиях поражений мозга и должен признать приоритетное значение предупреждения и лечения таких заболеваний, объявляемое «Десятилетием мозга» позволит сконцентрировать необходимое внимание правительства на исследовании, лечении и восстановительной терапии в этой области.

На основании всего изложенного сенат и палата представителей конгресса Соединенных Штатов Америки постановляют, что десятилетие, начинающееся 1 января 1990 г., объявляется «Десятилетием мозга» и Президент Соединенных Штатов обязывается издать обращение, призывающее все гражданские власти и народ Соединенных Штатов принять участие в этом десятилетии с соответствующими программами и формами финансирования»

Кроме того, американские ученые обратились к коллегам за рубежом с предложением совместно принять участие в «Десятилетии мозга». Причина такого обращения состояла в том, что обширные комплексные исследования требуют больших финансовых затрат и обременительны для любой страны. Мы в Институте теоретической и экспериментальной биофизики АН СССР в Пущине в феврале 1990 г. рассмотрели это обращение и подготовили записку в Государственный комитет науки и техники СССР с предложением, учитывая специфику нашей страны, создать дополнительную к американской собственную государственную программу СССР.

С помощью отделений информатики и вычислительной техники АН СССР и физиологии АН СССР к концу 1990 г. была создана программа, подписанная президентом АН СССР и принятая ГКНТ СССР.

Она получила название «Нейроинформатика и мозг». Основные ее направления следующие:

1. Создание компьютерных программ для формирования и отображения знаний о мозге; развитие базы данных нейроинформатики; создание совмещенных компьютерных моделей, описывающих работу мозга в терминах разных модальностей и на различных иерархических уровнях структурной организации мозга.

2. Выяснение принципов организации и функционирования анализаторно-исполнительных систем мозга, молекулярно-клеточных механизмов межнейронных коммуникаций; механизмов самоорганизации и пластической реорганизации нейронных сетей.

3. Выяснение общих механизмов распознавания образов и структур на различных уровнях организации взаимодействий; белково-лигандных, медиаторно-рецепторных, межнейрональных и других более высоких уровней организации.

4. Формирование критериев оценки опасных для мозга факторов внешней среды (химических и радиационных воздействий, синергизм их совместного действия, критические факторы патогенеза и психических расстройств).

5. Развитие биофизической теории устойчивости и надежности функционирования мозга. Разработка методов повышения умственной активности, предотвращения нервных срывов, реабилитации мозга после механических повреждений, умственных и неврологических расстройств.

6. Разработка принципов нетрадиционных параллельных способов обработки информации, базирующихся на автоволновых и осциллирующих процессах; создание новых технических компьютерных устройств, основанных на знании механизмов функционирования мозга.

7. Создание аудиовизуальных тренажерных компьютерных систем для диагностических, лечебных и образовательных целей (динамическая видеоэнциклопедия мозга).



Рассказать о всей программе (только рубрикатор которой занимает порядка 100 страниц) в рамках брошюры нет возможности, поэтому ограничимся несколькими примерами.

## МОЗГ МЫСЛИТ НЕ СИМВОЛАМИ

Хотелось бы надеяться, что в результате реализации программы удастся наконец ответить на вопрос: «Как мы мыслим?» Чтобы объяснить основу этой надежды, воспользуемся классическим примером — формой диалога между двумя специалистами, придерживающимися разных точек зрения на механизмы работы мозга. Назовем их условно физиком и биологом. Все аргументы спорящих взяты из дискуссий, которые начались 40 лет назад и продолжают по сей день [9].

**Физик.** Поскольку материал, на основе которого сделан компьютер, не имеет никакого отношения к вычисляемым им функциям (процедура вычисления зафиксирована лишь в программе), то программа в принципе может воспроизводить информационную работу мозга с любой заданной точностью. Все существующие ограничения и дефекты программ — явление временное, базирующееся лишь на неизбежных пока упрощениях, и настанет время, когда более мощные параллельные программы, имитирующие нейросети, позволят избавиться от ограничений и качественно повысить «умственные» способности техники.

**Биолог.** Программа компьютера может манипулировать лишь символами. Мозг же придает им смысл. Элементы сознательного разума должны обладать реальным семантическим (смысловым) содержанием. Мозг мыслит не символами, а смысловыми ситуациями, обеспечивающими выживание организма, например, распознает контуры хищника в зашумленной среде; мгновенно выбирает правильную реакцию на его появление; находит способ спасения — бегство или защиту; проводит различия между съедобными и несъедобными объектами мира, между половым партнером и другими животными; выбирает поведение в сложной и постоянно изменяющейся физической и социальной среде и т. д. Машина же оперирует с символами, перекладывая их по определенным правилам из ячейки в ячейку. Это есть синтаксис без семантики, когда за символами и операциями для производящего манипуляции нет смыслового наполнения.

**Физик.** Утверждения о том, что система «искусственного интеллекта» должна непременно обладать всеми свойствами мозга, например, такими, как способность чувствовать запах гниющего, абсурдны. Требовать полного соответствия по всем параметрам — все равно что добиваться от искусственного летательного аппарата (на том основании, что он должен летать) необходимости нести яйца. Нам мало известно о том, в чем именно состоит процесс мышления и семантика, поэтому всякая уверенность по поводу того, какие свойства здесь существенны, преждевременна.

**Биолог.** Мозг — это прежде всего мыслящая машина, манипулирующая молекулами, в соответствии с правилами, учитывающими их структуру. Именно особые свойства биохимических молекул закладывают основу эффекта сознания и других видов психических явлений, создавая на более высоких иерархических уровнях модель внешней среды, но описанную в определенных специфических для биологических систем структурных терминах. Построение ситуационной базы данных и доступ к ней в реальном масштабе времени в архитектуре, принятой в компьютерных системах, невозможны. В мозгу база знаний строится на основе других явлений, например боль, жажда, радость, возбуждение. Многие из этих механизмов ясны и формируются в иерархических системах «снизу вверх» от молекулярного уровня до уровня систем мозга (рис. 6). Например, чувство жажды, по крайней мере в некоторых случаях, обусловлено срабатыванием нейронов определенных типов в гипоталамусе, которое, в свою очередь, вызвано действием специфического пептида ангиотензина II.

**Физик.** Мозг совершенно не обязательно должен быть единственной физической системой, способной на мыслительную деятельность. Компьютерные программы, моделирующие мозговые процессы, должны отражать лишь информационный аспект этих процессов. Моделирование не следует смешивать с полным воспроизведением. Самолет летает не потому, что в нем полностью скопирован принцип полета птиц. Хотя можно (если нужно) представить себе компьютерную модель, отражающую воздействие пептидов на гипоталамус, которая будет точна вплоть до каждого отдельного синапса.

**Биолог.** С таким же успехом мы можем представить себе компьютерное моделирование процесса окисления углеводов в автомобильном двигателе или пищеварительного процесса в желудке. И модель процессов, протекающих в мозгу, ничуть не реаль-



Рис. 6. Иерархическая структурная организация нервной системы человека, с помощью которой реализуется мышление



нее моделей, описывающих процессы сгорания топлива или пищеварительные процессы. Нельзя привести автомобиль в движение, моделируя на компьютере окисление бензина, нельзя переварить обед, выполняя программу, моделирующую пищеварение. Моделирование мышления также не произведет нейрофизиологического эффекта мышления.

**Физик.** Искусственный мозг может и не пользоваться биохимическими молекулами и достичь того же эффекта. Например, с помощью аналоговых микропроцессоров можно создать устройства (и они уже созданы), которые будут по входу и выходу моделировать работу сетчатки или, например, улитки уха. Они в реальном времени реагируют на реальные сигналы: свет, звук. Такие схемы основаны на известных анатомических и физиологических свойствах сетчатки кошки и ушной улитки сипухи, и их выход по выбранным параметрам сигнала чрезвычайно близок выходам органов, которые они моделируют. Но в этих микросхемах не используются никакие нейромедиаторы, следовательно, нейромедиаторы могут и не являться необходимыми элементами для достижения желаемых результатов.

**Биолог.** Любая система другой природы, основанная на вакуумной технике, кремниевых кристаллах или оптических вентилях, должна обладать каузальными возможностями, эквивалентными соответствующим возможностям мозга. Добиться каузальных свойств мозга (не поддающихся абстрагированию) только за счет выполнения формальной программы операции с символами невозможно, эти свойства должны быть заложены в структуру логических элементов. Эти каузальные свойства начинаются с биологически важных молекул. Они могли эволюционно возникнуть случайно, но, раз возникнув, теперь уже они определяют мышление живых систем на всех уровнях, так как оно основывается на изменении структуры этих молекул. Любая система другой природы, возможно, и сможет мыслить, но совсем иначе, не в биологических терминах. Если же искусственно пытаться программировать техническую систему на противоестественную для нее биологическую ситуационную мыслительность, то это будет, несмотря на высокое быстродействие манипуляции с отдельными символами, умственно неповоротливая химера. Дело не в том, что современный компьютер и его программы не прошли по пути совершенства в воспроизведении процессов мышления до середины дороги. Они по этой дороге даже не шли. Они просто находятся на другой дороге...

Кто же прав в этом споре? Правы обе стороны, потому что они говорят о разных проблемах в изучении мозга. «Физик» подчеркивает важность в процессах мышления модели внешней физической среды и ее отражения на внутренний мир некоторой информационной программы. «Биолог» указывает на биофизическую специфику информационной системы нашего мозга. Обе позиции взаимно дополняют, а не исключают одна другую.

Аналогичные споры известны из истории биофизической науки, например, дискуссия между Ньютоном и его

школой, изучавшей физику внешних оптических раздражителей, и Гёте и его последователями, сформулировавшими основы биофизики цветного зрения; между Гальвани, настаивавшим на особом «животном электричестве», и Вольта, обнаружившим электрический эффект в неживых системах при контакте двух металлов, и т. д. Короче говоря, существуют два разных подхода, два векторных множества, отображающихся одно в другом, — внешняя физическая среда и ее модель в мозгу:

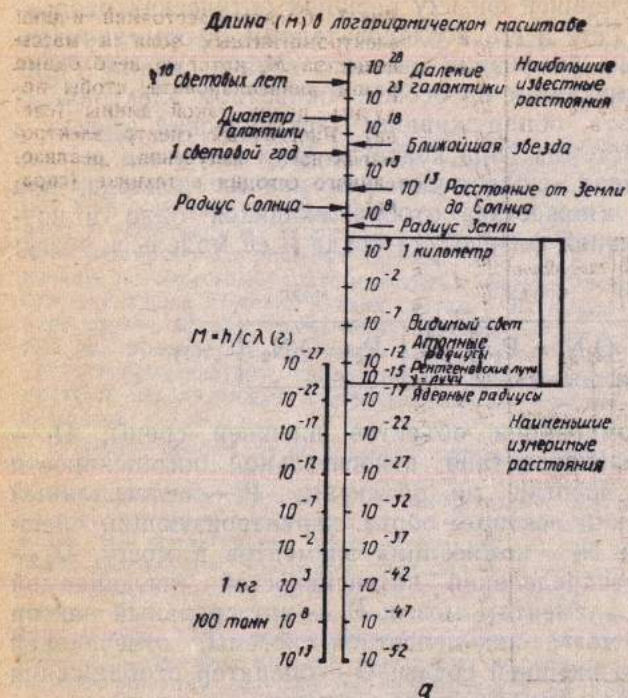
$$\begin{array}{ccc} \text{среда} & & \text{мозг} \\ \boxed{Q_1 N_1 = P_1} & \xleftrightarrow{G} & \boxed{P_2 = Q_2 N_2} \end{array}, (1)$$

где  $N_1$  — композиция объектов внешней среды;  $Q_1$  — функция распределения относительной интенсивности излучения энергии по объектам;  $P_1$  — интегральный энергетический вектор — образ, характеризующий внешнюю среду;  $N_2$  — композиция элементов в мозгу,  $Q_2$  — функция распределения интенсивностей поглощаемой энергии по элементам мозга;  $P_2$  — интегральный вектор состояния мозга как целостной системы, отвечающей воздействию внешней среды;  $G$  — оператор отображения или перехода одной системы в другую.

Суть записи (1) очевидна, это не более чем просто здравый смысл, отраженный на бумаге символами. Наша цель — в процессе реализации программы найти аналитическое выражение для оператора отображения  $G$  или доказать, что такое выражение нельзя написать. Методология такого подхода очевидна. Изменять параметры левой и правой частей выражения (1) и наблюдать, что будет происходить при этом с оператором  $G$ . Казалось бы, все очень просто! Однако за этой внешней простотой стоят три колоссальные по сложности проблемы — три «проклятия».

**«Проклятие размерности и размытости границ».** Окружающий нас мир многомодален, шкала электромагнитных волн простирается на десятки порядков (рис. 7). Человек как вид формировался под защитой атмосферы Земли в диапазоне умеренной космической радиации, поэтому мы не ощущаем жесткие излучения, включая дальний ультрафиолетовый диапазон, и не можем без приборов оценивать ситуацию, возникающую



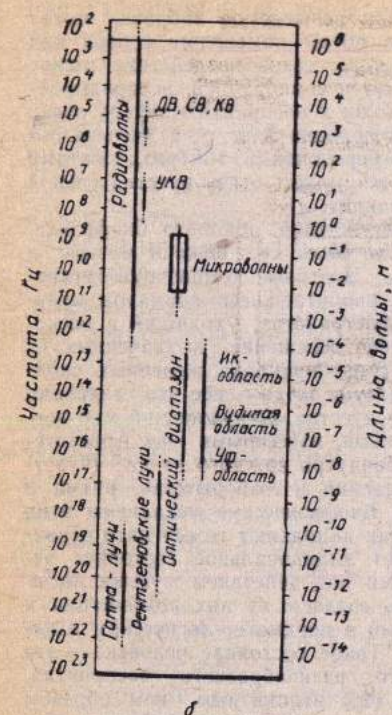


а

под действием волн этого диапазона. Именно поэтому так опасны последствия чернобыльской катастрофы и озоновых дыр. Где находится нижняя граница чувствительности нашего мозга к электромагнитным волнам, ответить трудно. По-видимому, в области инфракрасного излучения. Хотя есть данные, что на нас воздействуют и микроволновые излучения. Находясь в зоне их действия, мы испытываем неприятные ощущения [11].

Если рассматривать шкалу механических колебаний — от ультразвука до инфразвука, то и здесь появляется неопределенность. Мы не можем с абсолютной уверенностью утверждать, что наше восприятие звука ограничивается лишь полосой пропускания уха, так как известно, что инфразвуки также воздействуют на нас.

В этом я смог убедиться на собственном опыте, когда летом 1966 г. вместе с группой советских участников II Международного биофизического конгресса в Вене побывал на органном концерте в одном из крупнейших соборов Европы — соборе святого Стефана. Под его сводами музыка оказывала необычное воздействие на слушателей. Полифония фуг, имитирующая многоголосие, вызы-



б

Рис. 7. Спектр расстояний и длин электромагнитных волн и массы вещества  $M$ , которую необходимо разом аннигилировать, чтобы получить волну такой длины (слева). Растянутый спектр электромагнитного излучения, реализованного сегодня в технике (справа)

вала удивительный эффект. Басовые звуки обволакивали слушателей, кожа покрывалась мурашками, шевелились корни волос. Казалось, что широкий раскачивающийся спектр звуков то затягивал, то отпускал внутри нас какие-то струны. Развитие нескольких параллельных мелодических линий, порою сливающихся в одновременно гармоническом сочетании, будило что-то очень важное, но забытое, привязанное к врожденному первичному восприятию мира

«Слышимый звуковой диапазон взрослого человека простирается почти на десять октав, от 20 до 16·10<sup>3</sup> Гц, — пытался объяснить я этот эффект друзьям после концерта — У детей ухо воспринимает до 40·10<sup>3</sup> Гц. После 30—40 лет верхняя граница слуха снижается приблизительно на 80 Гц за каждые 6 месяцев. Поскольку мы все разного возраста, а эффект от воздействия похож, то, по-видимому, наше эмоциональное состояние определяется средними и низкими частотами звука, восприятие которых не связано с возрастом. Как известно, наибольшая чувствительность лежит в диапазоне от фа-диез до соль четвертой октавы, что соответствует пронзительному крику женщины или ребенка. Средняя частота ударов нашего сердца около 70 в минуту. Музыкальные ритмы несколько ниже этой частоты успокаивают, выше — взбадривают. Совсем низкие звуки действуют угнетающе. Инфранизкие звуки 5—7 Гц вызывают чувство беспокойства. Модуляция воздуха, выхо-



дающего из больших труб органа, так называемое вибрато, может давать инфразвуки. Возможно, что объем помещения собора как резонатор их подчеркивает. Кроме того, такое воздействие может быть связано не только со слухом, но и с вибрацией, воспринимаемой кожей. Хотя чувствительность кожи к восприятию звуков очень мала, но зато площадь нашей кожи порядка  $2 \text{ м}^2$ , т. е. больше общей поверхности двух барабанных перепонки в  $10^4$  раз. Поэтому в прохладном помещении собора кожа может стать чувствительной к проведению низкочастотных колебаний»

Такими были 25 лет назад рассуждения молодого биофизика. Теперь я начинаю понимать, что дело было не только в музыке, а во всей обстановке происходящего. Цветовые композиции гигантских витражей; стены, за столетия пропитавшиеся ароматом культового дыма; большие свободные пространства; уходящий в бесконечность темноты купол; контрастное освещение выхваченных из мрака скорбящих скульптурных групп; прохлада каменных сводчатых опор; притихшие в ожидании чуда люди — все это создавало неповторимую атмосферу таинства искусства. Окружающий мир воспринимался не только пятью чувствами, известными еще Аристотелю, но другими, направленными «вовнутрь каждого из нас (чувством объема и пространства, ожидания и любопытства, ритма и времени, радости и беспокойства). Биофизические механизмы этих чувств еще плохо исследованы, но они дополняют гамму пяти основных. Вся их совокупность изменяет эмоциональное состояние человека. В такой обстановке мы сами под действием музыки выбираем из памяти какие-то эпизоды, создаем из них комбинации и интерпретируем их способом, который в предметно-логическом мышлении оказывается неестественным. Такое состояние человека — это сон наяву в объеме обостренного разнообразия восприятия. В подобной обстановке каким-то еще непонятным нам образом проявляется таинственная сила параллельного взаимодействия различных сенсорных областей коры мозга и его подкорки, прокладывающая путь в мир, куда мы не можем проникнуть другими способами.

Ясно, что образ (паттерн) внешней среды при исследовании мозга должен формироваться на основе комбинаций спектральных составляющих разных модальностей. Перебор их комбинаций представляет задачу высокой степени сложности.

**«Проклятие метаморфоз».** Окружающий нас мир нелинеен и поэтому может представать перед нами в разных обликах — от абсолютно детерминированного до крайне хаотического. Примером первого являются стабильные ситуации, описываемые законами классической механики. Другой мир живет по законам статистической физики, это так называемый мир большого бильярда, когда траектория движения каждого объекта изменчива, быстро теряет устойчивость и практически не обладает памятью о начальных условиях движения. К системам с таким типом поведения относятся так называемый двумерный газ Лоренца, броуновское движе-

ние взвешенной частицы под действием ударов молекул жидкости, шумы в электронике и очень многие биологические и социальные процессы. Вероятностные законы во втором случае могут быть сформулированы на статистическом материале и дают прогноз поведения лишь с определенной степенью вероятности.

Между этими двумя полюсами имеется широкий класс процессов, которые нельзя считать в полной мере детерминированными, но и не следует относить к чисто вероятностным. Если их рассмотрение вести с позиций детерминированных законов, то их можно определить как детерминированные процессы с шумовой компонентой. Если их рассматривать с другого конца, т. е. с позиций стохастических процессов, то это стохастические процессы с набором предпочтительных сравнительно устойчивых траекторий. Без искусственного сглаживания гистограмм распределения траекторий, описывающих эти процессы, нельзя получить гладкие кривые, например, в виде законов Гаусса, Пуассона или Лоттки — Парето. В этом случае в кривых возникают порою весьма заметные изломы, которые и указывают на то, что имеется квантованность в гладком разнообразии траекторий. Неважно, как называть такой промежуточный класс процессов — детерминированной стохастичностью или стохастической детерминированностью. По сути дела, весь окружающий нас мир живет именно по этим промежуточным законам, а полюсы порядка и хаоса являются предельными вариантами.

Еще А. Эйнштейн убедился в тщетности попыток использовать детерминированное описание классической механики для броуновской частицы и принял за характеристику ее движения статистический параметр — коэффициент диффузии, т. е. количество частиц, проходящих через площадь условно выделенной поверхности в единицу времени [12]. Позднее были открыты многие новые свойства подобных процессов. Оказалось, что в разнообразии хаоса часто скрыта своя закономерность — странные аттракторы [13], фрактальные структуры [14], обратимость времени [15] и т. д.

Логично предположить, что коли наш мозг оптимальным образом отображает именно так устроенный внешний мир, то строение самого мозга должно содержать специальные механизмы, приспособленные для такого отображения.



Мозг — это энергетически открытая, диссипативная (поддерживающая свою структурную устойчивость за счет рассеяния энергии) нелинейная система, из всех структур организма самая далекая от термодинамического равновесия. Последнее важно. С одной стороны, чем дальше система от равновесия, тем большим набором состояний обладает ее структура и тем быстрее и полнее она способна формировать модель среды. С другой стороны, чем дальше система от равновесия, тем менее надежной должна быть ее конструкция. Не случайно медики подчеркивают: «Гибель мозга — гибель человека, все остальное поправимо».

В мозгу мы можем найти структуры и процессы, организованные по фрактальному и хаотическому принципам [16]. Имеются перестраиваемые по определенному алгоритму на разных структурных уровнях динамические образования, так называемые домены. Домен — это структурное образование, возникающее при определенных условиях внешней среды, когда набор внутренних связей группы элементов, образующих его, становится в несколько раз больше по сравнению с внешними связями одного домена с другим. Поэтому домены могут изменяться один относительно другого при прикладывании к ним меньших усилий по сравнению с теми, которые необходимы, чтобы вызвать изменение самого домена. Образование доменов, как будет ясно из дальнейшего изложения, обеспечивает пластичность, приспособляемость к условиям внешней среды.

Например, для многих кристаллов глобулярных белков модуль всестороннего сжатия составляет около  $7 \text{ Гн} \cdot \text{см}^{-2}$ , в то время как при одноосной деформации он меняется в зависимости от направления усилия от 2 до  $10 \text{ Гн} \cdot \text{см}^{-2}$ . Это говорит о том, что наряду с жесткими участками (модуль Юнга которых близок к аналогичному модулю оргстекла или эбонита) белковый кристалл имеет мягкие участки, т. е. своеобразные шарнирные соединения. Очевидно, что механизмы стабилизации отдельных биополимеров, объединяющихся в домен, определяются ван-дер-ваальсовыми слабыми взаимодействиями, водородными и ионными связями. Участки, соприкасающиеся с водной средой, естественно, характеризуются большим количеством заряженных групп на поверхности. Таким образом, потенциал взаимодействия отдельных доменов (например,  $\alpha$ -спиралей белка) опре-

деляется типом и симметрией расположения заряженных групп по поверхности домена. Сила связи изменяется под действием внешних условий. В этом и проявляется способность молекул перебирать свои многочисленные состояния, термодинамически приспосабливаясь к окружению, т. е. обладать зачатками примитивного мышления.

Аналогичная ситуация на следующем иерархическом уровне с доменами в мембрано-белковых системах. Целостность мембранного домена поддерживается за счет молекулярных взаимодействий внутри белкового каркаса — скелета клетки, поверхность которого заполнена фосфолипидом, и гидрофобным взаимодействием последнего с электролитом окружения. Сами же поверхностные мембранные слои, создавая целостные образования, соединяются между собой за счет слабых сил молекулярного сцепления. Такая пленка легко искривляется в пределах взаимного перемещения слоев, доменов, но для ее дальнейшего искривления требуются более значительные усилия, так как начинается деформация всей мембрано-белковой конструкции.

Внутри клетки похожая ситуация, например, динамическая вязкость клетки за счет блочного ее строения изменяется в различных направлениях от  $2 \cdot 10^{-3}$  до  $50 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{см}^{-2}$ . Одним из путей функционирования биологических систем при физиологических значениях параметров является их подстройка под параметры внешней среды за счет взаимного движения доменов.

Изучение с помощью электро-, магнито- и термоэнцефалографии процессов, идущих в нервной ткани, свидетельствует о том, что в мозгу в процессе мышления возникают домены из клеток, которые образуют единое целое на временах от 50 мс до десятков лет. Здесь возникает как синхронизация потоков ионов — носителей возбуждения, так и последующие структурные изменения. Созданные методы представления этих процессов с помощью многоточечной регистрации позволяют визуализировать картину доменных перестроек.

В нашем институте была разработана методика трансплантирования фрагментов мозга, например ткани гиппокампа, в переднюю камеру глаза животного. В этом случае живая ткань мозга защищена от внешней среды только роговицей глаза толщиной около 150 мкм. Эта оболочка в значительной степени прозрачна для



инфракрасного излучения. Электрофизиологические эксперименты показывают, что фрагмент мозга в камере глаза получает питательные вещества для своего нормального функционирования, имеет нормальную электрическую активность с волнами частотой 1—5 Гц. С помощью инфракрасной термовизионной системы удалось наблюдать пространственную динамику изменения тепловых картин, характеризующих состояние доменной структуры с температурным разрешением 0,1 К.

В процессе исследования в термограммах были обнаружены компоненты, связанные с электрической активностью доменов, состоящих из групп нейронных ансамблей. На рис. 8 показана дифференциальная картина динамики последовательной смены возбуждений в различных участках трансплантата. Перепад от черного к белому составляет 0,2 К. Черные участки имеют большую температуру. Интервалы между кадрами 1,5 с. Средняя температура активных зон может отличаться от средней температуры остальной ткани на 0,3—0,8 К [17].

Если рассмотреть следующий уровень иерархической организации, то здесь мы заметим объединение уже целых частей органов в системы с гибкими связями. Например, эмоции — это функция не одного специфического отдела мозга, а объединение многих его отделов при распространении волн возбуждения по их сетям, в так называемом круге Папеса или лимбической системе. Организация таких макродоменов в значительной степени запрограммирована генетически и происходит на определенном временном интервале развития организма.

Общую оценку возникающих доменов в мозговых структурах (символ  $P_2$  в выражении (1)), обеспечива-

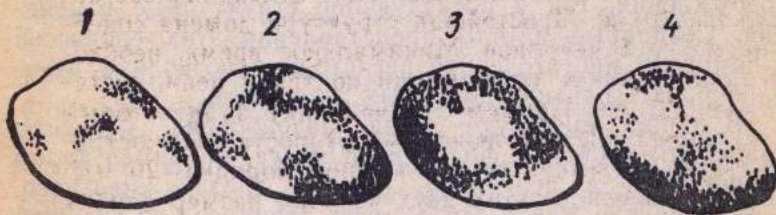


Рис. 8. Динамика смены доменных конфигураций при тепловой активности фрагмента мозга

ющих пластичность мышления, произвести сложно. Возьмем только один иерархический уровень, клеточный, и допустим, что имеются только два нейрона  $A$  и  $B$ . Уже в этом случае возможны четыре типа связей, и соответственно четыре типа поведения: равноправная связь  $A$  и  $B$ ;  $A$  управляет  $B$ ;  $B$  управляет  $A$ ;  $A$  и  $B$  замкнуты в цикле с обратной связью. Из  $n$  элементов в общем случае возможно получить  $M$  комбинаций:  $\log_2 M = n^2 - n$ . Если же число элементов  $n = 10^9$ , то число комбинаций будет фантастически велико:  $\lg M = 3 \cdot 10^{17}$ . Общее разнообразие на всех иерархических уровнях структурной организации мозга трудно представить. Такой большой перебор вариантов осуществить невозможно.

Однако должны существовать коды отображения одного иерархического уровня в другой. Такой код известен для нижних уровней, например переход нуклеотидной последовательности ДНК в аминокислотную последовательность белков. Для других уровней коды еще не установлены. Если они будут выяснены, то можно будет вести изучение физического наполнения параметров  $Q_2$  и  $N_2$  (выражение (1)) на любом наиболее удобном для экспериментатора уровне без потери общности понимания работы всей системы.

В иерархической системе имеется временное согласование образования доменов на различных уровнях организации:

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (2)$$

где  $x_1$  и  $x_2$  — размеры двух элементов разных иерархических уровней, а  $v_1$  и  $v_2$  — соответственно скорости переноса материи (энергии, информации) на этих уровнях. Предельное время реакции одного нейрона составляет около 10 мс. Простейшая структура домена содержит не менее 5 нейронов. Минимальное время, необходимое для передачи информации по такой цепи, составит около 50 мс. Примем эту величину за некоторый квант времени. Для позвоночных скорость распространения нервного импульса по аксону порядка 20 м/с. Определим на основе этих двух величин размер домена на уровне целостного организма, снабженного нервной системой регуляции. Он составит около 1 м, так как  $0,05 \cdot 20 \text{ м/с} = 1 \text{ м}$ . Если на другом уровне, например



внутри клетки, самые быстрые процессы идут со скоростью диффузии около  $10^{-4}$  м/с, то при тех же временных параметрах, 50 мс, получим для среднего размера домена 5 мкм, что соответствует линейному размеру синапса. Таким образом, два объекта разных масштабов в единой системе согласуются по временным параметрам и могут взаимодействовать как элементы одной сети обработки информации.

Однако большое разнообразие и количество комбинаций структур, образующих домены, имеют не только достоинства, но и недостатки. Неструктурированная система при подстройке под параметры внешней среды будет долго обучаться, выбирая в результате самоорганизации подходящие доменные конфигурации. В процессе эволюции был найден компромисс. В мозгу появились структурные ограничения перебора путем вертикального наращивания строения системы, которые закреплялись генетически.

Эволюционно структура мозга усложнялась по двум направлениям: с одной стороны, увеличивалось количество стволов, формирующих мозг, с другой — количество слоев в этих стволах.

Например, для высокоорганизованных живых организмов — высших насекомых и позвоночных, от рыб до птиц включительно, — эволюционно возникла четырех-слоевая нейронная система органов чувств, последовательно обрабатывающих информацию. У млекопитающих прибавился дополнительный пятый слой — кора головного мозга. Соответственно возросло число цепей, образующих вертикальные структуры — стволы. Например, для слуховой системы обезьяны число нейронов первого уровня, связанных с периферическим приемником (внутренним ухом), около  $3 \cdot 10^4$ , второго уровня (продолговатый мозг) —  $9 \cdot 10^4$ , третьего (средний мозг) — около  $4 \cdot 10^5$ , четвертого (промежуточный мозг) — также около  $4 \cdot 10^5$ , пятого (кора мозга) — порядка  $10^7$ . Преимуществом слоевой структурированности является автономный перебор вариантов в каждом слое и обмен между слоями обобщенной информацией.

Было бы наивно думать, что в процессе самоорганизации любой физический параметр домена, например время его жизни, пространственные размеры или координаты его расположения, однозначно и линейно связаны с психическими процессами. В действительности все

обстоит иначе: например,  $\alpha$ -ритм (8—13 Гц) — наиболее четкий образец электрической активности здорового мозга выражен лучше всего как раз в тех случаях, когда психическая активность наименьшая.  $\alpha$ -ритм — это состояние синхронизации большого количества клеток, когда домен разрастается настолько, что охватывает большую часть коры мозга. Это крайнее состояние клеток мозга, которое можно назвать кристаллическим порядком. Оно отличается от другого крайнего состояния, когда работа клеток рассинхронизована и домен вырождается во множества, состоящие практически из отдельных клеток. Каждая клетка «живет» собственной жизнью, не замечая соседей. Это — второе крайнее состояние мозга, хаос. Мышление — динамическое состояние доменов между порядком и хаосом, когда в процессе подстройки домен изменяет свои размеры. Такое состояние наилучшим образом соответствует стохастически детерминированной картине внешнего мира.

**«Проклятие неопределенности наблюдений».** Эта проблема имеет непосредственное отношение к правой части выражения (I), т. е. наблюдению процессов, происходящих в мозгу. Можно выделить два больших класса методов наблюдения за процессами мозга: инвазивные и неинвазивные (лат. *invasio* — проникновение внутрь, нашествие).

Первые позволяют регистрировать процессы внутри функционирующей системы. Для этого необходимо либо внутрь мозга ввести какой-либо физический зонд, либо просветить мозг насквозь зондом. Неважно, как будет выполнен зонд физически: в виде платинового или стеклянного микроэлектрода, пучка ионизирующего излучения рентгеновских лучей, ультразвука или высокочастотного магнитного поля в мегагерцовом диапазоне при ЯМР-спектроскопии [18].

Недостатки такого метода изучения известны. На них обратил внимание еще Н. Бор в своих двух (теперь уже классических) работах в 1948 и 1958 гг. [19]. Как при исследовании явлений квантового мира нельзя пренебречь влиянием измерительного инструмента на процесс измерения, так при исследовании мозга инвазивными методами необходимо учитывать эффект вмешательства введенного зонда во внутримозговые процессы. Из доменной иерархической организации процессов мышления следует, что всякое возмущение огромного



числа элементов непременно приводит, хотя бы временно, к их хаотическому беспорядку. В квантовой физике результат всякого взаимодействия между атомными системами зависит от исхода «соревнования» между различными устойчивыми уровнями, один из которых займет система после вмешательства в нее. С надлежащими уточнениями ситуация такого рода соответствует изменению доменной организации мозга под действием внесенной в нее в процессе исследования энергии. Другими словами, при исследовании мозга инвазивными методами мы сталкиваемся как с принципом дополненности, так и с принципом неопределенности.

Однако инвазивные методы имеют и достоинства с помощью зондирования можно получить трехмерную картину распределения процесса доменной реорганизации по объему мозга. Такая операция трехмерной реконструкции с помощью Фурье-методов разработана давно и широко используется при построении трехмерных томограмм [20]

Неинвазивные методы основаны на том, что мозг (как и организм в целом) создает вокруг себя различные физические поля и излучения — инфракрасное тепловое, радиотепловое, акустическое излучения, электрическое и магнитное поля, поле испаряющихся молекул (например, ароматических соединений), которые обладают хемолюминесценцией. Эти излучения и поля можно регистрировать различными физическими методами. Комплексный подход к изучению полей мозга и тела человека с целью разработки новых неинвазивных методов диагностики в нашей стране давно пропагандируется сотрудниками Института радиотехники и электроники АН СССР [21]

Приведем один пример сравнительно новых неинвазивных методов. Открытие высокотемпературной сверхпроводимости позволило создать датчики, регистрирующие чрезвычайно малые магнитные поля, напряженность которых составляет  $10^{-9}$  поля Земли. Эти датчики получили название СКВИД (сверхпроводящие квантовые интерференционные датчики) и стали использоваться в изучении процессов биомagnetизма возбудимых и сокращающихся органов (мозг, сердце, желудок и т. д.). Метод регистрации процессов, происходящих в мозгу, дает значительно больше информации с использованием СКВИДов, чем обычно используемые другие

неинвазивные методы — электроэнцефалография или термография, так как кости черепа сильно ослабляют электрические сигналы и тепловое излучение.

По оценкам специалистов, через 5 лет новый метод займет ведущее место в диагностике и в исследованиях во всех клиниках и лабораториях мира. В ряде клиник этот метод уже используется. Регистрируя изменения контуров магнитных полей вокруг головы пациента, можно локализовать очаги активности мозга. В настоящее время сотрудники Института атомной энергии им. И. В. Курчатова совместно с рядом других организаций разрабатывают систему регистрации магнитного поля с головы человека с помощью матрицы, состоящей из многих СКВИДов.

Казалось бы, неинвазивные методы полностью лишены указанных выше недостатков инвазивных, так как они регистрируют динамические карты полей вне мозга, не влияя при этом на перестройку самих доменных конфигураций. Однако неопределенность при этом не исчезает, а приобретает другой вид. Как уже отмечалось, доменные конфигурации образуются под действием различных сил. На выделенном структурно-иерархическом уровне в одной системе модальностей они могут быть сильными, в другой — наоборот, слабыми, например, смещение электронов на внешних орбиталях белков может приводить к тому, что кулоновские силы будут расталкивать одинаково заряженные группы, но возникающие при этом другие силы могут их стягивать в новую конфигурацию. Часть домена может отколоться и покинуть свою группу, если приобретет энергию, достаточную для того, чтобы достичь в пространстве параметров точки, где кулоновское отталкивание превосходит ван-дер-ваальсовы или ионные силы стягивания. При этом полная энергия дочернего домена меньше исходного. В результате распада домена часть энергии связи переходит в тепло и излучается, например, в области инфракрасного излучения и может быть зарегистрирована. Такое рассуждение справедливо для излучений любых модальностей.

С помощью какого-либо неинвазивного метода регистрируется суммарное излучение в определенной модальности, а требуется определить динамику самого процесса.

При этом исследователи сталкиваются с проблемой



«некорректности обратных задач». Обратными задачами в широком смысле этого слова называются задачи, которые решаются в обратном порядке причинно-следственных отношений (по следствию необходимо восстановить причину). В нашем случае наблюдается эффект, производимый изучаемой системой, — изменение поля вокруг головы (следствие), а выяснить нужно, как это поле зародилось внутри мозга (причина).

Обратим внимание на особенности таких задач. Они часто не имеют решения, т. е. результаты наших наблюдений могут не содержать необходимой информации. Может возникнуть неоднозначность решения, т. е. подобная конфигурация поля на поверхности головы может быть создана несколькими разными конфигурациями доменов внутри мозга. Наконец, такие задачи существенно чувствительны к ошибкам измерения. Механизм слабой помехозащищенности очевиден. Параметры доменов в объеме мозга вычисляются как разности близких величин напряженности полей вокруг головы. Образно говоря, использование неинвазивных методов регистрации внешних полей для определения перестройки доменов внутри мозга аналогично попыткам по виду мусора, вывозимого с завода, определить структуру его технологического процесса. Следует заметить, что само распределение полей, излучаемых мозгом, отражающее работу по изменению конфигурации доменов, дополнительно маскируется полями, излучаемыми кровотоком мозга, движением мозговой жидкости и пульсациями глассальных клеток.

Выход из такой сложной ситуации один (он и отражен в основных направлениях принятой программы): необходимо сформировать банк данных о работе мозга, полученных с использованием как инвазивных, так и неинвазивных методов разных модальностей, и создать систему совмещенных компьютерных моделей, описывающих работу мозга в терминах разных модальностей и на различных иерархических уровнях его структурной организации. Возможно, использование такого принципа дополнительности даст возможность создать компьютерную динамическую видеоэнциклопедию мозга, что позволит найти оператор  $G$  в выражении (1).

В заключение приведем пример одной из возможных работ по шестому разделу реализуемой программы.

## ФИЛЬТР, ПРЕДСКАЗЫВАЮЩИЙ БУДУЩЕЕ

В основе предсказания, независимо от того, сделано оно с помощью вычислений на ЭВМ или мозга, лежит физический процесс. Предсказание заключается в том, что выводы о возможности будущего события либо ряда событий делаются на основании обобщения предыдущего опыта.

Наша цель — показать, что активные автоволновые среды могут предсказывать будущее для определенного класса природных явлений, носящих циклический характер. Мы рассмотрим одну из возможных прогнозирующих систем, в какой-то степени напоминающую наш мозг.

Все многообразие сред можно представить в виде двух больших групп: консервативных и активных. Первые не имеют внутреннего запаса энергии; вторые, напротив, содержат распределенный по среде запас потенциальной энергии, которая может быть аккумулирована разными способами. Между этими группами иногда трудно установить границу. Тем не менее такое деление оправдано, что будет ясно из дальнейшего изложения.

Автоволны — это обобщенное понятие, позволяющее систематизировать экспериментальные факты и теоретические представления о некоторых нелинейных процессах, наблюдаемых в активных средах в физике, химии и биологии. Простейшие автоволны — это волны горения, например огненный фронт во время лесного пожара. Распространение автоволн сопровождается многими процессами: передачу информации в мозгу, сокращения сердечной мышцы, начальные этапы морфогенеза у некоторых простейших органов, активацию катализаторов в химической промышленности и т. д.

Автоволны возникают только в активных средах и по своим свойствам существенно отличаются от волн, распространяющихся в консервативных средах, например, от электромагнитных или механических волн.

Для волн в консервативных средах выполняется закон сохранения энергии. Если мы бросаем камень в воду тихого озера, то часть кинетической энергии камня переходит в энергию возмущения круговых волн на поверхности водоема. Законы взаимодействия волновых



Сравнение свойств волн в консервативных средах  
и автоволн в активных средах

Свойства	Волны	Автоволны
Приток энергии	—	+
Сохранение амплитуды и формы волны	—	+
Отражение от препятствий	+	—
Аннигиляция	—	+
Интерференция	+	—
Дифракция	+	+

возмущений выглядят просто для низкоамплитудных синусоидальных волн в консервативных средах: такие волны свободно проходят одна сквозь другую, и их взаимодействие сводится к алгебраическому суммированию колебаний в каждой из точек среды (принцип суперпозиции). Этим, в частности, объясняется классическая интерференционная картина — муаровый узор, образованный колеблющимися (там, где амплитуды суммируются) и спокойными (там, где амплитуды вычитаются) участками среды (рис. 9, а). Тот же фундаментальный принцип суперпозиции обуславливает два других характерных свойства обычных волн в консервативных средах — их способность к отражению от препятствий и границ среды и к дифракции (огибанию препятствий).

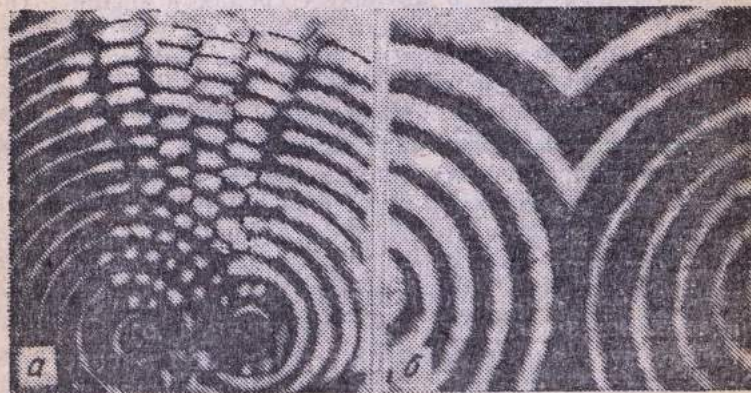


Рис. 9. Взаимодействие волн от двух источников: а — интерференция волн на поверхности воды; б — отсутствие интерференции для автоволн в активной среде

Хотя в консервативных средах энергия начального возмущения сохраняется, передавать сигналы на большие расстояния в такой среде сложно: плотность энергии в двух- и трехмерных средах падает с увеличением расстояния от источника, а форма сигнала искажается из-за дисперсии — разных скоростей распространения различных спектральных составляющих сигнала. Знак (+) показывает наличие соответствующего свойства, знак (—) — его отсутствие.

Из приведенной таблицы видно, что единственное общее свойство обычных и автоволн — способность к дифракции. Простейший пример активной среды — бикфордов шнур. Энергия запасена в пороховой начинке, а автоволна, бегущая вдоль шнура, — волна горения. В процессе ее распространения вещество шнура переходит из высокоэнергетического устойчивого состояния (несгоревший порох) в низкоэнергетическое (пепел и газы, остающиеся после горения), причем часть энергии, высвобождающейся в области горения, рассеивается, а остальная расходуется на розжиг следующих, еще не сгоревших элементов шнура. Рассмотренный пример поясняет следующее общее определение: автоволны представляют собой наблюдаемые структуры (в нашем примере пламя), которые поддерживаются процессами локального высвобождения запасенной в среде энергии, идущей на запуск аналогичных процессов в соседних областях.

Автоволны на значительные расстояния распространяются как бы по эстафете: сигнал заново воспроизводится в каждой точке среды. Энергия среды не сохраняется, а расходуется на поддержание автоволны, поэтому понятны два первых свойства автоволн, указанные в таблице. Автоволны черпают энергию из среды. Две автоволны, сталкиваясь, аннигилируют: ведь за фронтом бегущей автоволны, где происходит переход среды из высокоэнергетического состояния в низкоэнергетическое, тянется «выжженная» — в случае бикфордова шнура в буквальном смысле — зона, в которой такой переход уже произошел. В результате две столкнувшиеся автоволны уничтожают друг друга (рис. 9, б). Это их важное свойство нам потребуется в дальнейшем изложении. Аналогичные причины объясняют невозможность интерференции и отражения автоволн от границ среды и препятствий. Что же касается их способности



огигать препятствия, т. е. дифрагировать, то автоволны обладают ею в полной мере. Дифракцию можно объяснить здесь, как в случае обычных волн в консервативных средах, принципом Гюйгенса.

Существенные отличия автоволн от других типов волн и определили их выделение в особый класс явлений.

Наиболее интересны автоволны, распространяющиеся в активных средах при восстановлении запаса энергии. Именно такие среды нам в дальнейшем потребуются для создания прогнозирующей системы. Медленные процессы восстановления переводят среду из низкоэнергетического состояния (после пробега автоволны) в исходное высокоэнергетическое. В таких средах могут возникать локальные самоподдерживающиеся источники автоволн различных типов.

Рассмотрим три примера активных средств с восстановлением: горелку с медленно проводящими топливо фитилями, химическую активную среду и биологическую возбудимую ткань. Закономерности распространения и взаимодействия автоволн в активных средах не зависят от способа физической реализации среды.

**Активная среда в виде горелки.** Для демонстрации простейшего механизма возникновения и распространения автоволн в 1979 г. М. А. Морозовым и автором этой брошюры была придумана специальная горелка. В листе металла на близком расстоянии друг от друга были просверлены отверстия, в которые вставили полосы асбеста, соединенные друг с другом. Концы этих полос опустили в ванну с густым маслом. Сам по себе асбест не горит, но когда он пропитается маслом, то становится уже фитилем, и его можно поджечь. Скорость горения масла, пропитывающего асбестовый фитиль, выше скорости поступления горючего вещества (масла). Поэтому фитиль через некоторое время погаснет. После этого за счет диффузии он впитает масло, и его вновь можно поджечь и т. д. Таким образом, фитиль, как и нейрон мозга, может находиться в трех состояниях: горение; пауза (рефрактерный период), когда засасывается масло; готовность вновь вспыхнуть после поджога.

Если в такой демонстрационной горелке поджечь один из фитилей, то от него загорится соседний. Первый фитиль вскоре погаснет (выгорит масло), но к это-

му времени по горелке уже побежит фронт пламени. Так технически просто можно создать активную среду с восстановлением: каждый ее элемент (фитиль) может в отличие от бикфордова шнура вспыхнуть не один, а сколько угодно раз. Отметим, что повторно поджечь фитиль можно не только внешним источником, но и пламенем, подведенным по среде. Для этого достаточно линию фитилей, вдоль которой бежит пламя, замкнуть в кольцо, и пламя начнет вращаться по нему. Если же фитили заполняют плоскость, то на ней при определенных условиях будет вращаться огненный вихрь или распространяться круговые волны.

**Активная среда на основе химической реакции.** Химическая активная среда была создана в нашем институте А. М. Жаботинским и А. Н. Заикиным в 1970 г. и представляет собой тонкий слой жидкости, где протекает окислительная реакция Белоусова (позднее эта реакция в научной литературе получила название реакции Белоусова — Жаботинского). Реакция имеет циклический (колебательный) характер. В отличие от большинства известных окислительных процессов, которые идут до исчерпания одного из субстратов (окислителя или восстановителя), в ходе этой реакции выделяется ингибитор, тормозящий реакцию на некоторое время после того, как исчерпана лишь небольшая доля реагентов. Состав реакционной смеси следующий (он был описан Б. П. Белоусовым в середине 50-х гг.): лимонная кислота — 2,00 г, сульфат церия — 0,16 г, бромат калия — 0,20 г, серная кислота (1:3) — 2,0 мл, вода до общего объема — 10,0 мл. Церий (металл переменной валентности) играет роль маятника: он появлялся то в окисленной, то в восстановительной форме.

Попеременное изменение степени окисления церия проявляется в периодическом изменении окраски раствора. Для получения периодической реакции можно использовать и иные субстраты (сегодня известно около 50 подобных колебательных химических реакций). Описание аналогичной реакции позднее было уточнено Р. Нойесом, Р. Филдом (США) и Э. Кёрошем (Венгрия).

Если указанную реакционную смесь налить тонким слоем в плоский сосуд, то за счет ухудшения перемешивания каждый малый объем жидкости можно рассматривать как элемент активной возбудимой среды с



восстановлением, по которой автоволны окисления могут пробегать столько раз, насколько хватит запасов субстратов (рис. 10). В реакции Белоусова—Жаботинского за один раз окисляется приблизительно 0,01 субстрата, и волна окисления может пробежать около 100 раз. Механизм распространения волн окисления в принципе тот же, что и волн горения (горение — частный случай окисления): возбужденные («горящие») элементы среды возбуждают («поджигают») соседние.

**Активная среда в виде возбудимой биологической ткани.** Систематическое исследование активных сред биологической природы было начато в 1966 г. в нашем институте В. И. Кринским с соавторами.

Наиболее известный пример такой среды — нервное волокно. Распространяющийся по нему импульс также оказывается автоволной; он представляет собой электрохимическую волну перехода между двумя состояниями: покоя, когда разность потенциалов на мембране воло-

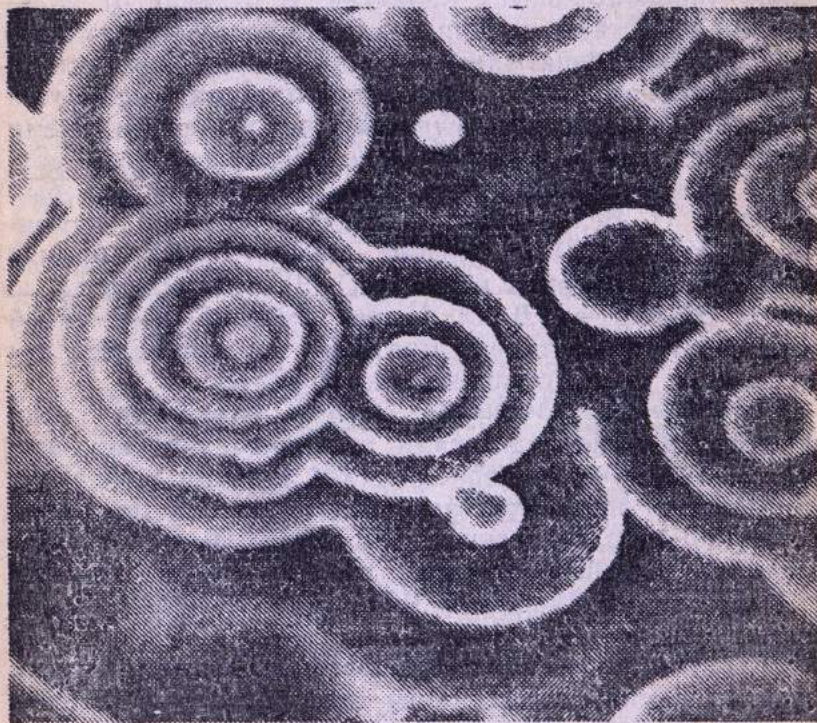


Рис. 10. Автоволны в химически активной среде

на велика (приблизительно 0,08 В), и активного состояния — возбуждения, когда разность потенциалов мала (около +0,04 В). При распространении нервного импульса в каждой точке возбудимой мембраны высвобождается энергия, исходно запасенная в виде неравновесных концентраций ионов калия и натрия по обе стороны мембраны (рис. 11). В живых организмах, помимо одномерных активных сред, нервных волокон, существуют двух- и трехмерные активные среды: головной и спинной мозг, сердечная мышца, гладкомышечные стенки кишечника, матки, мочевого пузыря. Распространяющиеся по ним автоволны имеют ту же физическую природу, что и нервный импульс, отличаясь от последнего лишь длительностью и скоростью; однако в процессах жизнедеятельности организма их роли различны. Если импульс, бегущий вдоль нервного волокна, служит для передачи информации, то, например, идущая по сердцу волна возбуждения запускает каскад биохимических процессов, инициирующих сокращение сердечной мышцы.

Принципы функционирования всех активных сред (как физических, так и химических и биологических) оказываются похожими и могут быть описаны на языке математики одними и теми же уравнениями. Эти

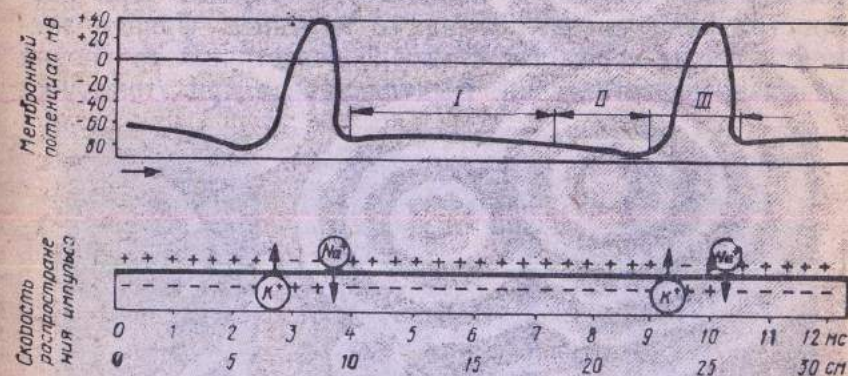


Рис. 11. Распространение импульса возбуждения (фронта волны) по нервному волокну. Вверху — параметры импульса. Римскими цифрами обозначены периоды, в которых живая ткань находится в разных состояниях: I — период покоя; II — период восстановления (рефрактерности); III — период возбуждения. Внизу — схематическое изображение деполаризации нервной ткани в момент прохождения импульса

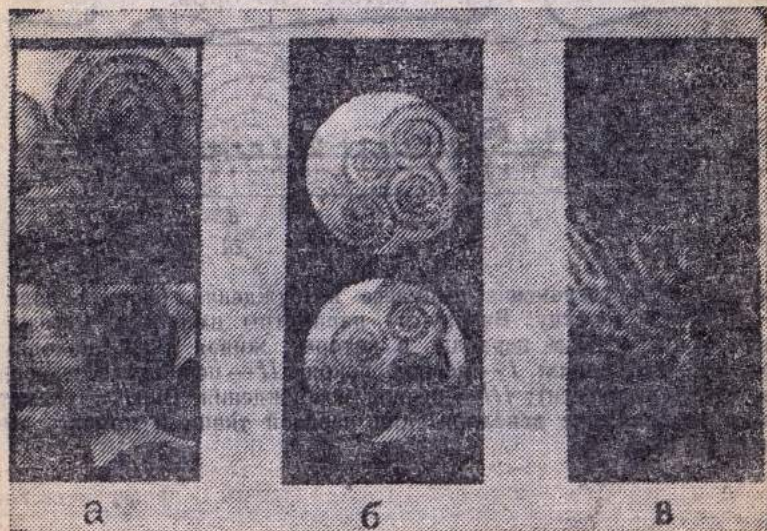


уравнения имеют вид дифференциальных уравнений параболического типа:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_U \Delta U + f(U, V); \quad \frac{\partial V}{\partial t} = D_V \Delta V + \varphi(U, V). \quad (3)$$

где  $U$  — энергия горения (в модели распространения пламени в горелке), концентрация активных радикалов (в модели химической реакции), разность потенциалов на мембране клеток (в модели возбуждения биологических тканей);  $V$  — необходимое количество горючего вещества (в модели распространения пламени), концентрация окисленной формы катализатора (в модели химической реакции); трансмембранная проводимость клеток (в модели возбуждения биологической ткани);  $D_U, D_V$  — коэффициент диффузии волн возбуждения и волн восстановления (рефрактерности);  $t$  — время;  $\Delta$  — оператор Лапласа;  $f(U, V)$  и  $\varphi(U, V)$  — функции, определяющие связь между параметрами  $U$  и  $V$ . Вид этой связи зависит от поведения системы в точке. К характеристике связи мы еще вернемся.

Во всех случаях активная среда может рассматриваться как энергетически двухуровневая система, которая может находиться в двух существенно различных состояниях: высоко- и низкоэнергетическом. При распространении автоволны на ее переднем фронте элементы среды переходят с высокоэнергетического уровня на низкоэнергетический. Выделяющаяся при этом энер-



гия расходуется, как уже было сказано, на запуск аналогичных переходов на участках среды, расположенных непосредственно перед фронтом автоволны.

Активные среды без восстановления после перехода остаются на низкоэнергетическом уровне, и автоволна повторно по ним распространяться не может (например, бикфордов шнур, волны фазовых переходов). В активных средах с восстановлением автоволны могут распространяться в принципе сколько угодно раз, так как каждый элемент такой среды возвращается на высокоэнергетический уровень вследствие медленных процессов восстановления — накачки энергии.

В активных средах существуют одинаковые конфигурации автоволн, которые можно классифицировать по сходству их формы и механизму возникновения. Можно выделить по крайней мере четыре типа автоволн: концентрические волны, или, как их еще называют, ведущие центры (пейсмекеры), спиральные волны (ревербераторы), ячеистые волны (например, ячейки Бенара) и пространственные вихри (рис. 12).

Отметим три основных свойства динамики взаимодействия автоволн. Во-первых, существуют два режима работы источников волн — ждущий и автоколебательный и возможен переход от одного к другому. Во-вторых, между источниками возникает конкуренция за пространство, в котором распространяются испускаемые ими автоволны. В-третьих, имеется возможность управления частотой излучения автогенераторов.

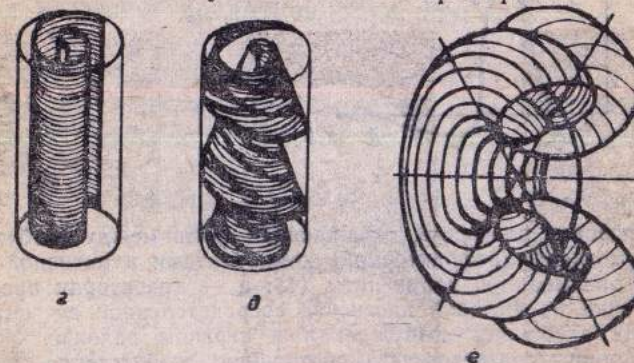


Рис. 12. Различные типы автоволн, возникающих в активной среде с восстановлением запаса энергии: а — концентрические автоволны; б — спиральные автоволны; в — ячеистые автоволны; г — простые пространственные автоволны — вихри; д — скрученные пространственные автоволны; е — вихревые пространственные кольца



Система уравнений (3) описывала поведение активной среды в пространстве. Соответствующая этому уравнению сосредоточенная система описывается уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= f(U, V) \\ \dot{V} &= \varphi(U, V)\end{aligned}\quad (4)$$

и представляет собой нелинейную релаксационную систему с  $N$ -образной характеристикой (рис. 13) (обобщенная модель Ван-дер-Поля), которая может быть как ждущим генератором одиночных волн (режим I), так и автогенератором непрерывного испускания концентрических волн (режим II на рис. 13, б). Изменяя

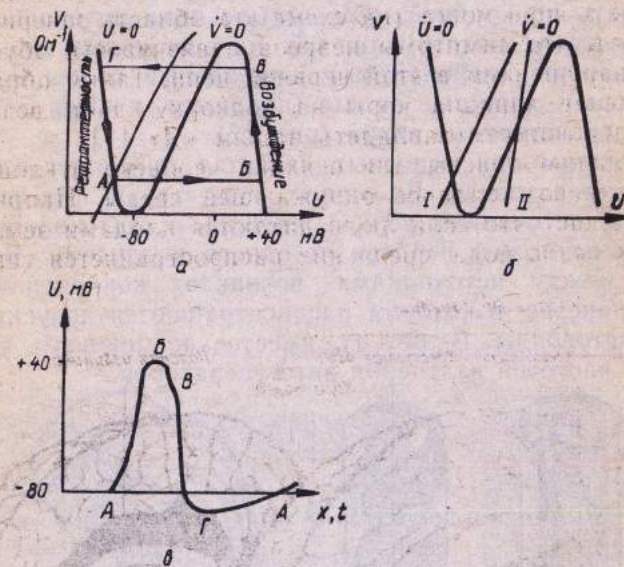


Рис. 13. Фазовая плоскость, отражающая связь между возбуждающей и тормозящей (рефрактерной) компонентами в активной среде в модели, описываемой уравнением (4): а — траектория представляющей точки на фазовой плоскости сосредоточенной системы, порождающая автоволну возбуждения в нервном волокне. Участок  $BV$  траектории соответствует состоянию возбуждения, участок  $BGA$  — рефрактерности; точка  $A$  и ее окрестность соответствуют состоянию покоя; б — фазовая плоскость для двух режимов: I — ждущий генератор одиночных импульсов; II — автогенератор; в — профиль изменения потенциала в нервном волокне, соответствующий траектории движения, представляющей точки по фазовой плоскости

взаимное положение функций  $\dot{U}$  и  $\dot{V}$  на фазовой плоскости, можно переводить систему из ждущего режима в автогенераторный. Этот переход достигается увеличением скорости подачи энергии в систему после возбуждения или увеличением скорости потребления энергии во время возбуждения, другими словами, увеличением коэффициента усиления в цепи возбуждения и уменьшением коэффициента усиления в цепи торможения.

Допустим, что имеются два автогенератора, создающих концентрические автоволны, распространяющиеся в активной среде. Один излучает их с частотой  $\omega_1$ , другой —  $\omega_2$ . Волны, как уже отмечалось, при столкновении уничтожают друг друга (аннигилируют). Генератор, испускающий волны с большей частотой, шаг за шагом (с каждым циклом испускания волны) будет «отвоевывать» пространство у низкочастотного автогенератора и через некоторый промежуток времени поглотит его. Время, за которое произойдет поглощение, равно

$$t = \frac{l}{v} \left( \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2} \right), \quad (5)$$

где  $l$  — расстояние между генераторами;  $v$  — скорость распространения автоволны,  $v = \text{const}$  для данной среды;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  соответственно круговые частоты испускания автоволн первым и вторым автогенераторами. Если частоты  $\omega_1 = \omega_2$ , то это время станет бесконечно большим. Другими словами, два равночастотных автогенератора не могут поглотить друг друга. Если  $\omega_2$  близко к нулю, то время захвата территории у второго автогенератора первым будет минимальным.

Рис. 14 иллюстрирует увеличение территории, захватываемой автогенератором в химической активной возбудимой среде.

Частотой работы автогенераторов в активных средах можно управлять, например, путем изменения скорости расхода энергии в цепи возбуждения или скорости восстановления энергии через цепь торможения. В нервных сетях этот процесс обеспечивается в возбуждающих или тормозящих синаптических окончаниях за счет выделения соответствующих медиаторов, влияющих на работу ионных каналов нейрона. В описанной выше горелке такое управление можно обеспечить, например, изменяя вязкость масла, подавая периодически



на фитиль растворитель или изменяя сечение фитиля, пережимая его.

Однако для технической реализации лучше искать такие среды, в которых можно в цепях управления частотой автогенераторов использовать электрические или световые сигналы. Один из таких вариантов реализуется, например, в химической среде на основе реакции Белоусова—Жаботинского при добавлении в среду светочувствительного катализатора на основе рутения [22], другой—на основе фотодиодов, включаемых в цепь обратной связи активных элементов среды; по-видимому, возможно для изготовления активных сред использовать жидкокристаллические матрицы, белковые светочувствительные молекулы [23] или специальные стекла [24]. Важен принципиальный момент, что существуют такие активные автоволновые среды, состоящие из матриц автогенераторов, частота которых меняется пропорционально интенсивности попадающего на них сигнала.

Как уже отмечалось, чтобы делать прогноз, нужно иметь модель внешней среды. Отдадим предпочтение модели циклической структурной организации внешней среды, поскольку она достаточно проста и в то же время содержит большое разнообразие форм поведения. Кроме того, она не требует жестких причинно-следственных ограничений. В цикле «причины и следствия» периодически меняются места и зависят от момента или места, с которого мы начали наблюдение. Процес-

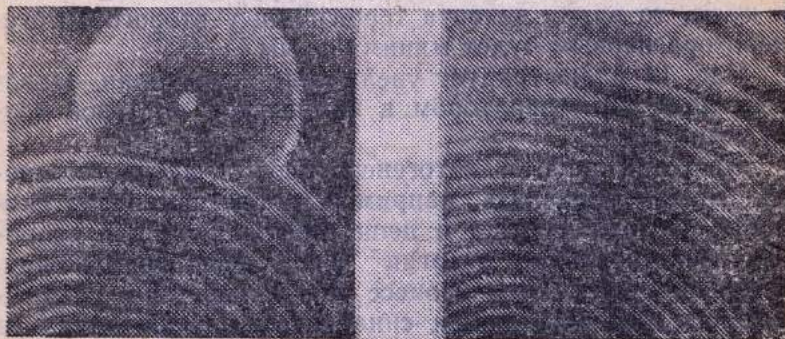


Рис. 14. Уничтожение низкочастотного автогенератора автоволнами высокочастотного автогенератора в реакции Белоусова—Жаботинского

сы, протекающие вокруг нас, действительно имеют существенную периодическую компоненту. Когда мы говорим о «стреле времени», то и в этом случае мы можем рассматривать развитие процесса как периодическое, но с большим периодом. В таких процессах предсказание возможно на большие временные интервалы. Возникает вопрос: «Что такое большой временной интервал?» Он большой по сравнению с чем? Приведем примеры.

Существующая сегодня небесная механика Ньютона с поправками релятивистского уточнения закона всемирного тяготения Эйнштейна обладает предсказательной силой на миллионы лет. Масштаб эволюции Вселенной—это миллиарды лет. На таких временных интервалах влияние так называемых малых параметров может оказаться весьма существенным, и возможно, что в этом случае Вселенная выйдет на циклический процесс с очень большим периодом по сравнению, например, со временем существования нашей планетной системы.

Итак, за временной интервал предсказания («горизонт предсказания») следует принять отрезок времени, меньший, чем период нахождения системы в данном устойчивом состоянии (другими словами, интервал между двумя бифуркационными точками траектории ее развития). Если достаточно полно известна периодичность смены траекторий развития системы, т. е. имеется обширный материал наблюдения за ее поведением между многими бифуркационными точками, то интервал предсказания может быть расширен.

Наличие периодов в процессах развития внешней среды очевидно. Периодическое движение Земли вокруг Солнца дает период 365,25 сут. Движение Луны вокруг Земли—пример ритма с периодом 29,53 сут. 7-суточная неделя—это пример периодичности колебаний атмосферы, коррелирующих с флуктуациями ионосферы Земли под влиянием изменения потока заряженных частиц, излучаемых Солнцем (солнечного ветра). Вращение Земли вокруг своей оси дает суточный (или циркадный) ритм. Жизнь биосферы—это также набор разных ритмов, определяемых жизненными циклами популяций, состоящих из отдельных особей. Перечень циклических процессов можно продолжать, но приведенных достаточно, чтобы сделать вывод: мы живем в мире, моделью значительной части которого может быть вза-



имеют периодические процессы. Если это так, то возникает вопрос: почему же так сложно делать предсказания в этом гармонично устроенном мире?

В подавляющем большинстве циклических систем амплитуды и частоты движения различных «маятников», формирующих циклы, зависят от энергии, поступающей извне в выделенную для исследования систему. Изменение величины энергии, в свою очередь, зависит от движения «маятников» других иерархических уровней. Свойство зависимости частоты от энергии называют неизохронностью. Причем зависимость частоты от энергии может быть разной. Частота может расти пропорционально энергии в степени  $3/2$ ,  $1$ ,  $1/2$ . Эта зависимость определяется организацией системы.

Неизохронность колебаний характеризуется изменением частоты на единицу изменения энергии, поступившей в систему. Чем больше эта величина,  $d\omega/dE$ , тем меньше инерция движения «маятников», тем быстрее они входят в резонанс и выходят из него (тем короче интервал между бифуркационными точками) и тем сложнее делать предсказание в такой системе.

В системе «маятников» резонансы могут возникать не только при соотношении частот их движения  $1:1$  (колебания в унисон), но и при других значениях кратности:  $1:2$ ,  $2:5$ ,  $1:3$ ,  $1:4$ ,  $1:5$ ,  $3:5$ ,  $3:7$  и т. д. Именно этим фактом объясняется наличие у ряда планет многочисленных спутников, устойчиво вращающихся с разными периодами вокруг них. Однако если система неизохронная и в нее поступает извне много энергии, а связь между «маятниками» слабая, то может начаться миграция частот «маятников» по различным резонансным соотношениям. Такая миграция по шкале частот известна. Траектории частотного движения пересекаются друг с другом в фазовом пространстве, и возникает неограниченное блуждание системы по резонансам, позднее получившее название диффузии В. И. Арнольда, описавшего динамику этого процесса. В этом случае движение маятников между резонансами несинхронизовано по фазам.

Можно представить себе такой машинный эксперимент [25]. В некоторой среде помещается  $n$  неизохронных генераторов, исходно имеющих разброс параметров, другими словами, генетическую вариацию. Эта вариация определяется конструктивными параметрами

генераторов. Генераторы связаны через источник совместного питания, который, в свою очередь, получает энергию от другого источника, объем которого неограничен. Исходное наполнение источника совместного питания (разнообразие внешней среды) может изменяться в широких пределах.

Поведение таких осцилляторов демонстрирует любопытное свойство. При бедном источнике совместного питания через определенное число циклов наблюдения неизохронные генераторы синхронизуются и пульсируют в унисон. При богатом источнике питания и большой генетической вариации синхронизации вообще не возникает. Система в этом случае проявляет свойства хаотического поведения. Наконец, при других параметрах генетической вариации и разнообразии внешней среды возникают промежуточные формы поведения. Происходит синхронизация осцилляторов с набегающим сдвигом фаз. Возможна также синхронизация с разбивкой на группы генераторов, колеблющиеся в унисон. Сами группы имеют между собой фазовый сдвиг. Наконец, имеет место частичная синхронизация, когда между группами, колеблющимися в унисон и имеющими фазовый сдвиг, появляются генераторы «конформисты», присоединяющиеся то к одной, то к другой группе. Они создают картину, приближающуюся к полной десинхронизации, хаосу. Система как бы квантует сама себя, создавая из комбинаций осцилляторов различные доменные конфигурации.

Любой физический процесс можно описать изменяющейся в пространстве и во времени функцией, которую, в свою очередь, можно разложить на сумму других функций. Как известно, для периодических процессов наиболее удобной формой является разложение в ряд по гармоническим составляющим — в ряд Фурье. Такой ряд быстро сходится и ограничен наивысшей частотой, имеющей место в периодическом процессе. Всегда можно сделать прямой и обратный переход от пространства реального времени в Фурье-пространство, где переменной является частота.

Теперь сформулируем одну из задач предсказания: как будет себя вести в будущем неизохронный осциллятор, находящийся в системе других связанных с ним осцилляторов? Какие частоты изменения его поведения являются существенными и наиболее полно характери-



зуют систему «среда — осциллятор»? Чем ограничена точность прогноза?

Начнем с ответа на последний вопрос. В одномерном случае периодический неизохронный процесс можно записать, например, так

$$y(t) = a_1 \sin [\omega_1 t + \theta(t)], \quad (6)$$

где  $\theta(t)$  — изменение фазы этого процесса. Если мы знаем закон изменения функции  $\theta(t)$ , то мы можем осуществлять прогноз с высочайшей точностью на любой временной интервал. Если принять представление о структуре нашего мира как о наборе сообщающихся сосудов с разной емкостью энергии и соответственно с разным набором циклов ее обмена, то моделью поведения внешней среды может быть, например, выражение:

$$\begin{aligned} y(t) &= a_1 \sin [\omega_1 t + \theta_1(t)], \\ \theta_1(t) &= a_2 \sin [\omega_2 t + \theta_2(t)], \end{aligned} \quad (7)$$

$$\theta_n(t) = a_{n+1} \sin [\omega_{n+1} t + \theta_{n+1}(t)],$$

где  $a_2, a_3, a_4, \dots$  — амплитуды сигналов, модулирующих частоту основного ритма, или, другими словами, девиация частоты. Выбор частоты основного ритма зависит от временного интервала, в котором мы стремимся сделать предсказание.

Ограничим рассмотрение двумя иерархическими уровнями. На рис. 15 показаны примеры изменения поведения процесса во времени, когда частота неизохронного осциллятора изменяется по гармоническому закону:

$$y(t) = a_1 \sin (\omega_1 t + a_2 \sin \omega_2 t). \quad (8)$$

На рис. 16 даны фрагменты Фурье-образов, соответствующие этим процессам.

Если частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  отличаются в десятки раз, то даже при больших значениях наблюдается периодический характер изменения процесса (рис. 16, а):  $\epsilon = 50$ ,  $\omega_1/\omega_2 = 0,034$ . Аналогичная картина и при обратном соотношении частот  $\omega_2/\omega_1 = 36\,000$ ,  $\epsilon = 10$  (рис. 16, б). Если  $\omega_1$  близко к  $\omega_2$ , а  $\epsilon = a_2/\omega_1$  больше единицы, то процесс приближается к хаотическому, например, на рис. 15, в:  $\epsilon = 5$ ,  $\omega_2/\omega_1 = 3,45$ .

Вывод очевиден: к видимости хаоса приводит сравнительная близость частот самого процесса и источника питания, модулирующего его частоту. Когда  $\omega_2$  много больше или меньше основной частоты процесса, то, рассматривая процесс в заданном диапазоне, можно пре-

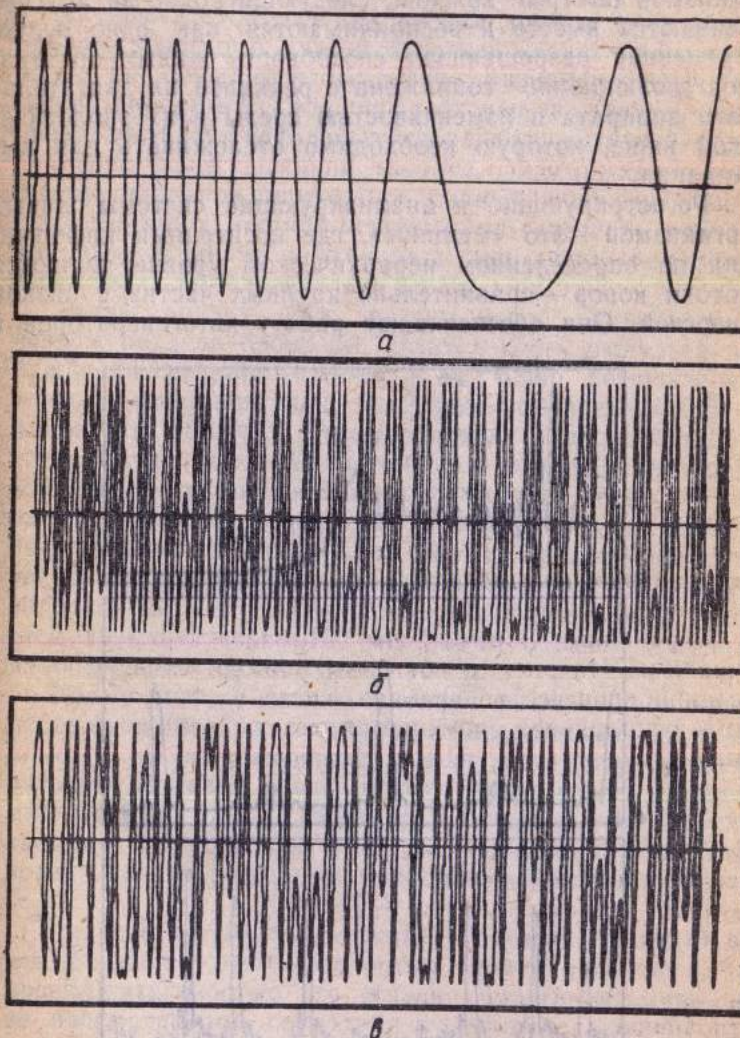


Рис. 15. Развитие по времени фрагментов синусоидального процесса с модулируемой по синусоидальному закону фазой с параметрами: а —  $\epsilon = 50$ ,  $\omega_2/\omega_1 = 0,034$ ; б —  $\epsilon = 10$ ,  $\omega_2/\omega_1 = 36\,000$ ; в —  $\epsilon = 5$ ,  $\omega_2/\omega_1 = 3,45$



небредь сверхбыстрыми или сверхмедленными модулирующими компонентами. Следует заметить, что выбор диапазона предсказания задается и конструктивными параметрами самой системы, делающей прогноз.

В анализаторно-исполнительных системах живых организмов быстрые явления, следующие одно за другим, сливаются вместе и воспринимаются как одно целое. Временная разрешающая способность живых организмов эволюционно сопряжена с реакцией их двигательного аппарата и изменчивостью среды в их экологической нише, которую необходимо отслеживать для выживания.

Регистрирующие и анализирующие системы живых организмов — это «машины», где носителями информации на определенном иерархическом уровне являются потоки ионов — сравнительно крупных частиц с низкой энергией. Они обеспечивают работу автогенераторов в

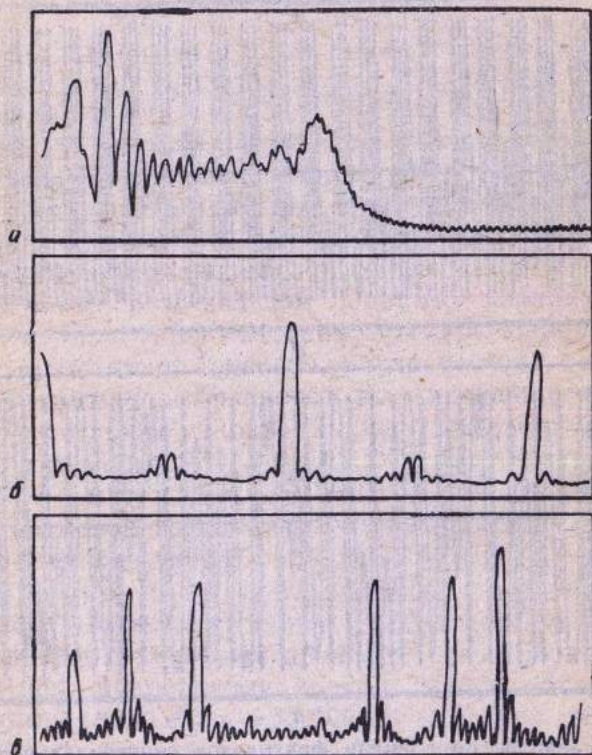


Рис. 16. Фрагменты Фурье-образа в частотной области, соответствующие процессам, изображенным на рис. 15

активных средах мозга. Поэтому пространственно-временные анализирующие возможности автоволновых активных сред в мозгу животных ограничены сверху областями, занимаемыми сравнительно крупными осцилляторами (минимальное расстояние между ионными каналами на мембранах нервных клеток 80—100 Å).

Активные среды, формирующие домены из информационных частиц с низкой энергией, могут реагировать лишь на суммарное изменение высокоэнергетических частиц, например фотонов, так как в каждой точке пространственно-временных координат активной среды, анализирующей внешний процесс, перекрывается множество волновых пакетов от разных «легких» высокоэнергетических частиц. Максимальная частота событий, на которую может реагировать наш мозг, ограничивается сверху приблизительно 10 Гц.

Такую оценку дает рассуждение, приведенное в первом разделе брошюры. Длительность импульса возбуждения нейрона — около 3 мс плюс рефрактерный «хвост», приблизительно в 2 раза превосходящий по длине сам импульс. Таким образом, быстродействие в точке вычислительной системы на активной автоволновой среде, составленной из нейронов, не более  $10^2$  операций в секунду. Скорость распространения нервного импульса по аксону порядка 20 м/с. Средняя длина путей от анализирующих до исполнительных элементов и обратно около 2 м. На прохождение этого пути требуется приблизительно 100 мс. Таким образом мы получаем верхнюю частоту около 10 Гц.

Кроме того,  $\alpha$ -ритм — основной ритм нашего мозга, проявляющийся на электроэнцефалограммах и, по-видимому, характеризующий основную частоту автогенераторов активной среды мозга, также лежит в диапазоне от 8 до 13 Гц. Резюмируя, отметим, что верхней частотой прогноза, для которого приспособлен мозг человека (не вооруженный приборами), является частота 10 Гц.

Нижняя предельная частота прогноза событий определяется продолжительностью памяти организма, т.е. продолжительностью его жизни. Подчеркнем, что мы не рассматриваем социально-технические способы расширения этого диапазона в человеческом обществе (письменные источники, памятники культуры, научные архивы и т. д.).



Перейдем к описанию процесса работы активной автоволновой среды, предсказывающей будущее. На активную двумерную автоволновую среду, состоящую из матрицы автогенераторов, проецируется в рамках некоторого интервала времени Фурье-образ внешнего процесса. Среда должна синтезировать с наибольшей достоверностью развитие этого процесса в будущем. Частоты автогенераторов пропорциональны интенсивности гармоник Фурье-образа. Таким образом, раструбы волн работы автогенераторов (см. рис. 14) будут отражать распределение интенсивностей гармоник в Фурье-пространстве. Динамика взаимодействия автогенераторов в активной среде, как уже отмечалось, такова, что через некоторый интервал времени вблизи высокочастотных генераторов (гармоник Фурье-образа с большой интенсивностью) будут подавлены низкочастотные генераторы (гармоники Фурье-образа с малыми интен-

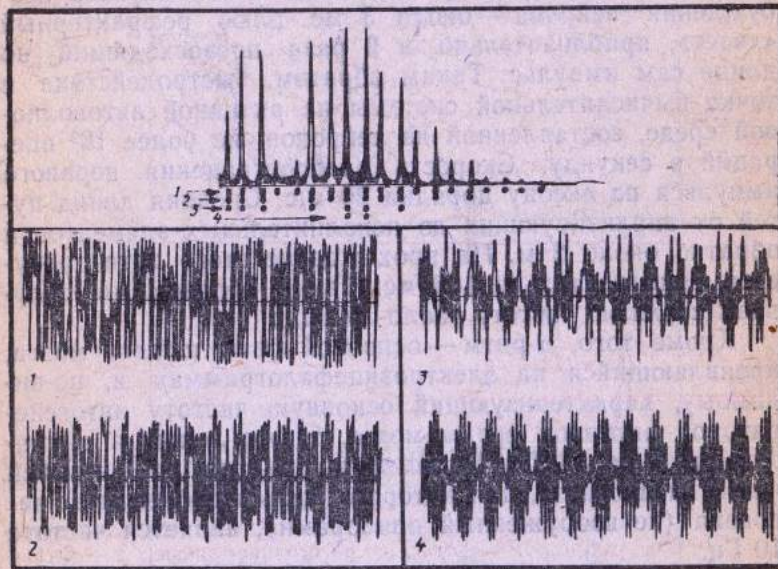


Рис. 17. Компьютерный модельный пример очистки одномерного процесса с помощью операций, осуществляемых активной автоволновой средой. На верхнем графике показан Фурье-образ процесса. Под графиком звездочками помечены гармоники, которые остаются после последовательных четырех стадий очистки Фурье-образа с помощью «игры» автогенераторов. Ниже показано изменение реального процесса, разворачивающегося во времени, соответствующего последовательным четырем стадиям очистки Фурье-образа

сивностями). В конце концов за достаточно большое время вся площадь активной зоны будет занята волнами наиболее высокочастотного автогенератора. Остальные автогенераторы будут им поглощены.

Однако, если делать обратное преобразование Фурье, последовательно задавая временной интервал очистки локальных зон, то мы будем получать сигнал от прошлого процесса, проходящий последовательные стадии очистки. Он будет освобождаться от шума и от гармоник разложения, которые, находясь рядом с пиками высокой интенсивности, являются модуляторами главных частот процесса.

Описанный здесь нелинейный динамический фильтр, основанный на логике активных автоволновых сред, обладает свойством самоочистки и отличается за счет ло-

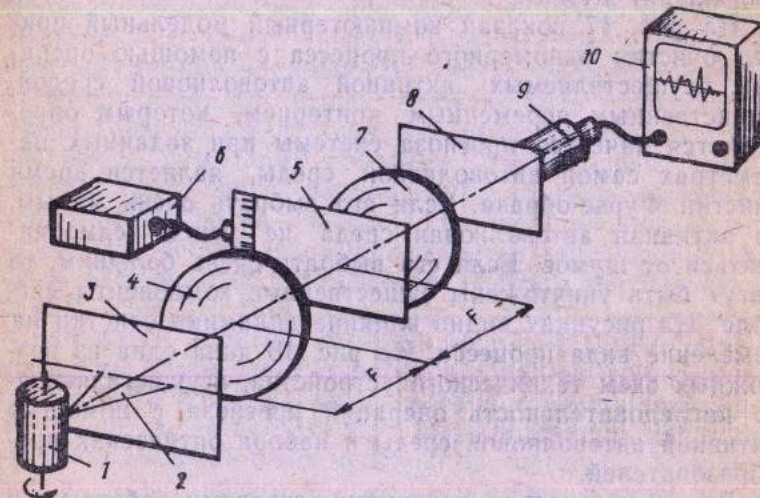


Рис. 18. Одна из блок-схем устройства: 1 — источник лазерного излучения; 2 — лазерное излучение; 3 — плоскость представления изменения функции, отражающей поведение внешней среды в прошлом; 4 — первая линза, осуществляющая перевод функции прошлого в Фурье-образ;  $F$  — фокусное расстояние линзы; 5 — Фурье-плоскость, где формируется с помощью первой линзы Фурье-образ функции, отражающей поведение внешней среды в прошлом. В этой плоскости располагается активная автоволновая среда; 6 — блок питания активной автоволновой среды; 7 — вторая линза, осуществляющая обратный перевод преобразованного с помощью активной автоволновой среды Фурье-образа поведения этой функции в будущее; 8 — плоскость отображения будущего поведения процесса как функции времени; 9 — устройство регистрации этой функции; 10 — устройство измерения и визуализации



кальности действия от известных технических методов фильтрации сигналов в Фурье-области. Создание технических систем для оптимальной частотной фильтрации требует предварительного знания о характере сигнала и шума. В данном случае таких знаний не требуется. Активная автоволновая среда из автогенераторов обладает самонастройкой, поэтому она сама выбирает траекторию очистки Фурье-образа по реперным гармоникам, тем самым выделяя наиболее существенные гармонические компоненты, характеризующие процесс. Однако и для нее существуют ограничения точности прогноза, определяемые соотношением сигнала к шуму. Предрассудок — это есть нечто иное, как неправильно сделанный человеком прогноз, когда за сигнал его мозгом был принят шум.

На рис. 17 показан компьютерный модельный пример очистки одномерного процесса с помощью операций, осуществляемых активной автоволновой средой. Единственным переменным критерием, которым определяется качество прогноза системы при заданных параметрах самой автоволновой среды, является время очистки Фурье-образа. Если его выбрать очень малым, то активная автоволновая среда не успеет самоочиститься от шумов. Если его выбрать очень большим, то могут быть уничтожены существенные компоненты сигнала. На рисунках видно влияние динамики очистки на изменение вида процесса. На рис. 18 дана одна из возможных схем технического устройства, осуществляющего последовательность операций прогноза с помощью активной автоволновой среды и набора оптических преобразователей.

Возможно, что по похожему алгоритму работают и структуры нашего мозга. Однако матрицы автогенераторов мозга — это не гомогенная система, подобная описанной выше. В структуру автоволновой среды нашего мозга генетически заложены исходные различия между конструктивными параметрами нейронов — это память о прошлом. Такая память является априорной моделью, отражающей усредненные параметры внешней среды, в которой эволюционно сформировался наш мозг. Структура нашего мозга оптимальным образом приспособлена к прогнозу ситуаций в пространственно-временном диапазоне нашего существования. Поэтому если мы из-за поспешности выводов или из-за плохой памяти

ошибаемся в прогнозе каких-либо событий, то адресовать эти ошибки следует лишь к самим себе. Рассмотренная нами гомогенная автоволновая среда из автогенераторов — это, образно говоря, мозговая структура без генетического опыта прошлого.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из идей брошюры была идея защиты неформальной логики, отличающейся от той, на которой строится большинство программ современных компьютеров.

Неформальная логика пока непопулярна. В чем же отличие неформальной логики от формальной? Формальная логика — это лишь одна из основ мышления человека. Ее можно назвать современным компьютерным детерминированным мышлением. Формальная логика утверждает, что мысль должна быть однозначной. Закон тождества учит тому, что надо однозначно отождествлять символами объекты окружающей среды. Мысль (построение рассуждений) должна протекать непротиворечиво по линейной цепочке: причины — следствия. Логический закон противоречия запрещает в процессе рассуждения и анализа вопросов противоречить самому себе. Нельзя, например, о положении, которое принимается верным, говорить в то же время как о неверном. Кроме того, говорится в законе исключенного третьего, недопустимо на вопрос отвечать неопределенно, ни да, ни нет. Из двух противоречащих друг другу высказываний одно необходимо истинно, а другое ложно, и нет ничего третьего. Наконец, всякая мысль лишь тогда верна, когда она вытекает как следствие из другой мысли, служащей ей в данном случае основанием (закон достаточного основания). Поэтому мышление должно быть только последовательным.

В рамках этой стройной системы логического мышления, восходящей еще к Аристотелю, человек чувствует себя комфортно, потому что она замкнута, внутренне не противоречива и однозначна. Однако практика подсказывает, что и в замкнутой системе утверждений находятся высказывания, о которых нельзя сказать, истинны они или ложны. Более того, формальная логика отражает лишь один класс ситуаций, которые бли-



же к «порядку», чем к «хаосу», и поэтому не может обеспечить прогноз траекторий развития многих нелинейных систем, в том числе социальных и биологических. Все попытки декларировать создание, например, политических доктрин на основе формальных логических построений неизбежно приводят к догматизму, а следовательно, к гибели замкнутых мировоззренческих концепций. Творчество невозможно в рамках формальной логики.

Структура развитого мышления другая, здесь мысль многозначна. Важна не только мысль, но и эмоциональный образ, ей соответствующий. Здесь закона тождества не существует, и смысл одного и того же утверждения так же, как и его образ, может меняться в разных ситуациях. Развитое мышление лежит в основе неформальной логики.

Процесс мышления внутренне противоречив. Одно состояние доменной конфигурации системы отрицает другое; одна мысль отрицает другую. Одно и то же утверждение может быть и верным и неверным. В случайной среде исключение третьего невозможно. Ответом может быть и да и нет. Мысль может возникать спонтанно и не вытекать из другой мысли, а основываться на эмоционально-образном ситуационном восприятии. Закон достаточного основания не является законом развитого мышления.

Это не означает, что формальную логику необходимо забыть. Наоборот, предметно-логическое детерминированное мышление необходимо, и именно оно является основой классической физики и современного этапа технического развития. Смысл брошюры состоит не в обосновании запретов, а в защите развитого образного восприятия мира.

Красота человека в размышлениях, сомнениях, умении сострадать и ужасаться, оценивая возможные последствия своих действий. На такое способен лишь высокоразвитый мозг человека. Животные и компьютеры на это не способны, и в этом плане они счастливее нас. Если мы в погоне за мифическим счастьем отказываемся от этих черт, прекращаем подавлять инстинкты, то приобретаем иллюзию кратковременного счастья, но совершаем массу ошибок, ставя под угрозу будущее людей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Мотли М. Т. Оговорки // В мире науки.— 1985.— № 11.— С. 58—64; Гипноз и точность воспоминаний // В мире науки.— 1985.— № 8.— С. 69.
2. Элкон Д. Память и нейронные системы // В мире науки.— 1989.— № 9.— С. 16—25.
3. Аоки Ч., Сикевич Ф. Пластичность в развитии мозга // В мире науки.— 1989.— № 2.— С. 22—31.
4. Иваницкий Г. Р., Кринский В. И., Сельков Е. Е. Математическая биофизика клетки.— М.: Наука, 1978.— С. 255—261.
5. Грей У. Живой мозг.— М.: Мир, 1966.— С. 208—239.
6. Мур Дж. Паразиты, которые изменяют поведение своего хозяина // В мире науки.— 1984.— № 7.— С. 48—55.
7. Рапопорт Д. Л. Биологическая природа навязчивых состояний // В мире науки.— 1989.— № 5.— С. 55—62.
8. Neurobiology of the Trace Elements.— Vol 1, 2 // Edited by J. E. Dreosti and R. M. Smith.— The Humana Press, Inc. Clifton, N. J., 1984.
9. Сирл Дж. Разум мозга — компьютерная программа? Черчленд П. М., Черчленд П. С. Может ли машина мыслить? // В мире науки.— 1990.— № 3.— С. 7—21.
10. Тэнк Д., Дж. Хопфилд. Коллективные вычисления в нейроподобных электронных системах // В мире науки.— 1988.— № 2.— С. 44—53; Абу-Мостафа Я., Псалтис Д. Оптические нейронно-сетевые компьютеры // В мире науки.— 1987.— № 5.— С. 42—50.
11. Фостер К., Гай А. Биологическое влияние МКВ-излучения // В мире науки.— 1986.— № 11.— С. 4—13.
12. Эйнштейн А., Смолуховский М. Броуновское движение: Сб. статей / Пер. с нем. и франц.— М.—Л., 1936.
13. Кратчфилд Дж., Фармер Дж., Паккард Н., Шоу Р. Хаос // В мире науки.— 1987.— № 2.— С. 16—28.
14. Сандер Л. Фрактальный рост // В мире науки.— 1987.— № 3.— С. 62—69.
15. Иваницкий Г. Р. Ритмы развивающихся сложных систем.— М.: Знание (Сер. «Математика, кибернетика». — 1988.— № 9).
16. Голдбергер Э., Рични Д., Уэст Бр. Хаос и фракталы в физиологии человека // В мире науки.— 1990.— № 4.— С. 25—32.
17. Хижняк Е. П., Брагин А. Г., Иваницкий Г. Р., Кринский В. И., Тяжелов В. В. Тепловая активность изолированного фрагмента мозга // Биофизика.— 1986.— Т. 31.— Вып. 5.— С. 897—900.
18. Пикетт Я. ЯМР-интроскопия в медицине // В мире науки.— 1983.— № 2.— С. 18—29.



19. Бор Н. Квантовая физика и биология // В сб.: Моделирование в биологии.— М.: Изд-во иностр. лит., 1963.— С. 21—30.

20. Иваницкий Г. Р., Куниский А. С. Математические методы исследования структур.— М.: Знание (Сер. «Математика, кибернетика».— 1975.— № 6).

21. Годик Э. Э., Гуляев Ю. В. Физические поля человека и животных // В мире науки.— 1990.— № 5.— С. 75—83.

22. Биотехника — новое направление компьютеризации / Коллективная монография. Под общ. ред. Иваницкого Г. Р.— М.: Наука, 1990.— 145 с.

23. Всеволодов Н. Н., Иваницкий Г. Р. Биологические светочувствительные комплексы как технические носители информации // Биофизика.— 1985.— Т. 30.— № 6.— С. 883—887.

24. Стейн Д. Спиновые стекла // В мире науки.— 1989.— № 9.— С. 26—33.

25. Иваницкий Г. Р., Гойда Е. А., Деев А. А., Морозов М. А., Русанова Л. Ф. // Биофизика.— 1991.— № 2.

---

Научно-популярное издание

---

**Иваницкий Генрих Романович**  
**НЕЙРОИНФОРМАТИКА И МОЗГ**

Гл. отраслевой редактор *Г. Г. Карвовский*

Ст. научный редактор *К. А. Кутузова*

Мл. редактор *Н. А. Сергеева*

Обложка художника *А. А. Смирнова*

Худож. редактор *И. А. Емельянова*

Техн. редактор *О. А. Найденова*

Корректор *С. П. Ткаченко*

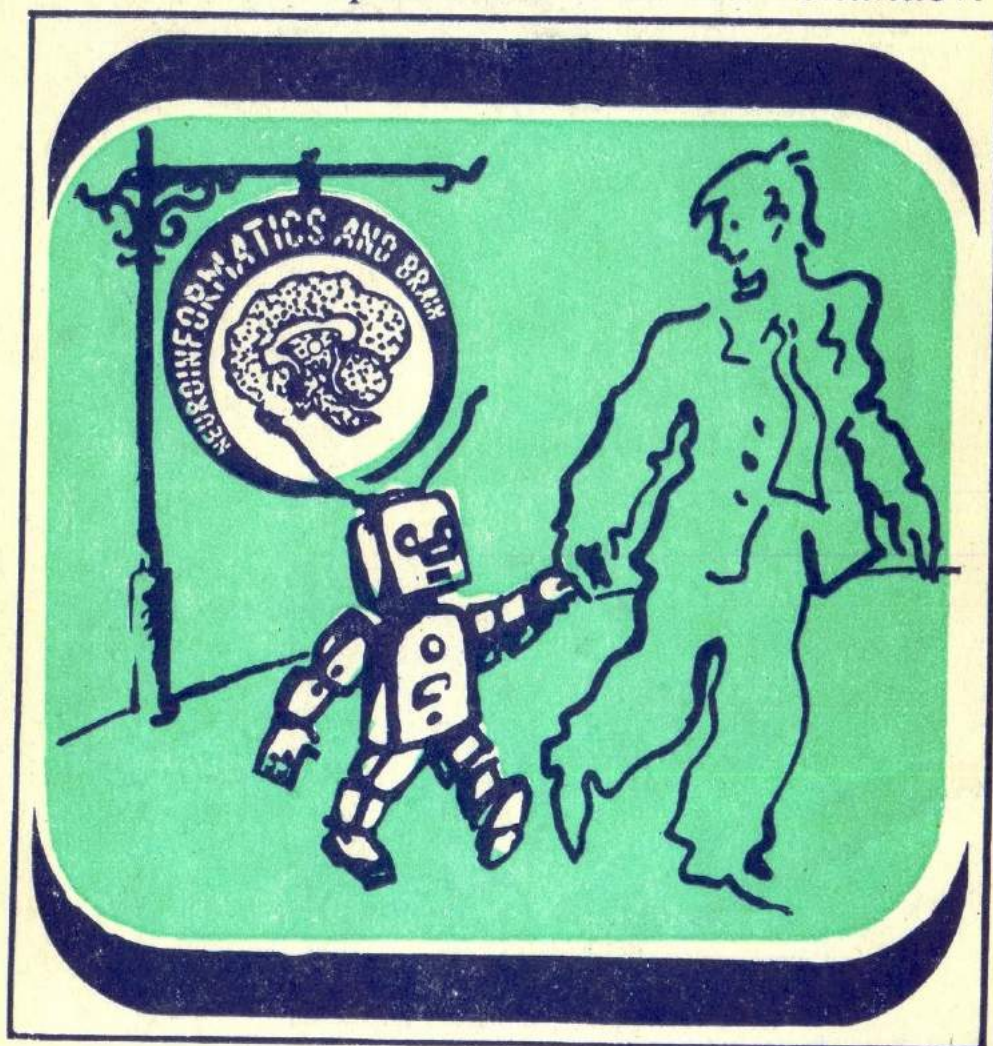
ИБ № 11331

Сдано в набор 12.03.91. Подписано к печати 18.06.91  
Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная  
Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,57 Уч.-изд. л. 3,56  
Тираж 11 697 экз. Заказ 388. Цена 40 коп.  
Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4.  
Индекс заказа 914006.  
Типография Всесоюзного общества «Знание».  
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



Дорогой читатель!  
Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку.  
Подписка на брошюры издательства «Знание» ежеквартальная, принимается в любом отделении «Союзпечати».  
Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в каталоге «Всесоюзные газеты и журналы» в разделе «Подписные серии издательства «Знание».

Цена подписки на год 4 руб. 80 коп.



Наш адрес:  
101835,  
Москва, Центр,  
проезд Серова, 4