Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности [1)]

УОРРЕН С. МАК-КАЛЛОК и ВАЛЬТЕР ПИТТС

Поскольку нервная активность подчиняется закону "все или ничего", то нейронные события и соотношения между ними можно изучать средствами логики предложений. Оказывается, что поведение любой сети может быть описано в этих терминах с привлечением более сложных логических средств для сетей, содержащих петли. Для всякого логического выражения, удовлетворяющего некоторым условиям, можно найти сеть, имеющую описываемое этим выражением поведение. Показывается, что различные выборы возможных нейрофизиологических предпосылок эквивалентны в том смысле, что для сети, действующей согласно одной предпосылке, существует другая сеть, действующая согласно другой и дающая те же результаты, хотя, быть может, не за то же самое время. Обсуждаются различные приложения исчисления.

I. ВВЕДЕНИЕ [2)]

Теоретическая нейрофизиология базируется на нескольких основных предпосылках. Нервная система является сетью нейронов, каждый из которых имеет тело и аксон. Места контакта нейронов, или синапсы, находятся всегда между аксоном одного и телом другого нейрона. В каждый момент нейрон имеет известный порог, который должно превзойти раздражение, чтобы вызвать нервный импульс. Все это, если не считать самого факта и момента появления импульса, определено нейроном, а не раздражением. От точки раздражения импульс распространяется по всему нейрону. Скорость распространения импульса по аксону пропорциональна диаметру аксона и варьируется от менее 1 *м/сек* в тонких аксонах, которые бывают обычно короткими, до более чем 150 *м/сек* в толстых аксонах, обычно длинных. Время распространения импульса по аксону не играет, следовательно, большой роли при определении времени прибытия импульсов в точки, удаленные от одного и того же источника на разные расстояния. Возбуждение передается через синапсы преимущественно от окончания аксона к телу. Остается спорным вопрос, обусловлено ли это необратимостью отдельных синапсов или же преобладанием некоторых анатомических конфигураций. Последнее предположение не требует гипотез ad hoc и объясняет известные исключения; однако любое предположение о причине такого явления совместимо с нижеследующим исчислением. Не известно ни одного случая, когда возбуждение, приходящее через один синапс, вызвало бы импульс в каком-либо нейроне, тогда как любой нейрон может быть возбужден импульсами, приходящими через достаточное число соседних синапсов в течение латентного периода [3)], который продолжается менее четверти миллисекунды. Наблюдаемая временная суммация [4)] импульсов в более длительных интервалах времени для отдельных нейронов невозможна и эмпирически зависит от структурных свойств сети. Между прибы-

---

1) Перевод статьи A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity, W.S. McCulloch and W. Pitts, Bull. Math. Biophys., 5, 115-133 (1943). Перед чтением этой статьи читатель должен ознакомиться с символикой Рассела и Уайтхеда и Карнапа, на которых авторы ссылаются. Изложение, местами весьма сжатое, не позволяет расшифровать полностью некоторые утверждения авторов. - *Прим. ред.*

2) Рекомендуем читателю ознакомиться с книгой М. Брейзье "Электрическая активность нервной системы", Издательство иностранной литературы, 1955 г., особенно с гл. IX. - *Прим.ред.*

3) См. цит. книгу Брейзье, стр. 79. – *Прим. ред.*

4) См. цит. книгу Брейзье, стр. 96. – *Прим. ред.*

тием импульсов к нейрону и распространением собственного импульса нейрона имеется синаптическая задержка, бо́льшая половины миллисекунды. В начале нервного импульса нейрон абсолютно невозбудим[1]. Затем его возбудимость быстро восстанавливается, достигая в некоторых случаях сверхнормального уровня, после чего она снова становится несколько ниже нормальной, а затем медленно возвращается к нормальному уровню. Частые возбуждения увеличивают понижение порога возбудимости ниже нормального уровня. Эти особенности связаны со временем и местом появления нервных импульсов и не связаны ни с какими другими особенностями действий нейронов. Из последних одно лишь явление торможения приводилось в качестве серьезного довода против этого тезиса. Торможение есть прекращение или предотвращение активности одной группы нейронов посредством одновременной или предшествующей активности другой группы. До последнего времени это могло быть объяснено предположением, что предшествующая активность нейронов второй группы может настолько повысить пороги вставочных нейронов[2], что последние будут не в состоянии возбудиться от нейронов первой группы, тогда как импульсы нейронов первой группы должны складываться с импульсами вставочных нейронов для возбуждения нейронов, теперь тормозимых.

В настоящее время показано, что в некоторых случаях, торможение происходит менее чем в одну миллисекунду. Это исключает участие вставочных нейронов и требует существования синапсов, импульсы через которые тормозят нейрон, возбуждаемый импульсами через другие синапсы. До сих пор эксперимент не обнаружил, является ли эта невозбудимость относительной или абсолютной. Мы предположим последнее и покажем, что разница несущественна для наших рассуждений. Каждый из видов невозбудимости может быть объяснен любым из двух способов: "тормозящий синапс" может обладать способностью вырабатывать вещество , повышающее порог нейрона, или же этот синапс может быть расположен таким образом, что локальное нарушение, производимое его возбуждением, препятствует изменению, вызываемому синапсами, которые в противном случае возбуждали бы нейрон. Поскольку в случае электрического раздражения уже известны условия, при которых подобный эффект имеет место, то первая гипотеза должна быть исключена, если и до тех пор пока она не будет подтверждена, ибо вторая не включает в себя никаких новых гипотез. Мы имеем тогда два объяснения торможения, основанных на одной и той же общей предпосылке и отличающихся только в отношении рассматриваемых нервных сетей и, следовательно, в отношении времени, потребного на торможение. В дальнейшем мы будем говорить о таких нервных сетях как об *эквивалентных в широком смысле*. Поскольку мы рассматриваем свойства сетей, инвариантные по отношению к этой эквивалентности, мы можем делать физические допущения, наиболее удобные для нашего исчисления.

Много лет назад один из нас, путем смелого рассмотрения этой аргументации, пришел к пониманию реакции любого нейрона как фактического эквивалента предложения, изображающего соответствующее возбуждение. Вследствие этого он попытался описать поведение сложных сетей в терминах символической логики предложений. Закон нервной активности "все или ничего" достаточен для того, чтобы возбуждение любого нейрона могло быть представлено как некоторое предложение. Физиологические соотношения, существующие при нервной активности, соответствуют, конечно, соотношениям этих предложений. Полезность такого представления зависит от тождественности физиологических соотношений с соотношениями логики предложений. Для каждой реакции любого нейрона имеется соответствующее утверждение некоторого простого предложения. В свою очередь оно влечет или некоторое другое простое предложение, или дизъюнкцию, или конъюнкцию, с отрицанием или без отрицания, аналогичных предложений, согласно с конфигурацией синапсов и порогом данного нейрона. Появляются две трудности. Первая относится к явлениям облегчения и

1) См. данный сборник, стр.136. - *Прим.ред.*

2) В оригинале internuncial neurons - вставочные нейроны, т.е. нейроны, которые соединяют между собой другие нейроны. - *Прим.ред.*

утомления [1], при которых предшествующая активность временно изменяет реакцию одной и той же части сети на последующий стимул. Вторая трудность касается явления обучения, при котором одновременные активности в предшествующее время изменили сеть так, что стимул, прежде бывший недостаточным, становится теперь достаточным. Однако мы можем сети, подверженные обоим изменениям, заменить эквивалентными фиктивными сетями, составленными из нейронов с неизменяемыми связями и порогами. Однако один пункт должен быть сделан ясным: никто из нас не смешивает формальной эквивалентности с фактическим истолкованием. Per contra! - Мы рассматриваем облегчение и утомление как зависящее от непрерывных изменений порога, связанных с электрическими и химическими переменными, такими, как остаточные потенциалы (after potentials) и концентрации ионов; обучение же мы рассматриваем как длительное изменение, могущее перенести сон, анестезию, конвульсии и кому. Значение формальной эквивалентности состоит в следующем: изменения, фактически лежащие в основе облегчения, утомления и обучения, никоим образом не затрагивают выводов, следующих из формальной трактовки активности нервных сетей, и соотношения соответствующих предложений остаются соотношениями логики предложений.

Нервная система содержит много циклических путей. Их активность так регенерирует возбуждение всех участвующих в них нейронов, что связь с прошлым становится неопределенной, хотя при этом все же предполагается, что афферентная активность реализовала один из некоторого числа классов конфигураций во времени. Точная спецификация этих зависимостей посредством рекурсивных функций и определение тех из них, которые могут быть воплощены в активности нервных сетей, завершают теорию.

II. ТЕОРИЯ: СЕТИ БЕЗ ПЕТЕЛЬ

Примем следующие физические допущения для нашего исчисления.

1. Активность нейрона удовлетворяет принципу "все или ничего".

2. Возбуждению нейрона в какой-либо момент времени должен предшествовать латентный период накопления возбуждений определенного фиксированного числа синапсов. Это число не зависит от предыдущей активности и от расположения синапсов на нейроне.

3. Единственным запаздыванием в нервной системе, имеющим значение, является синаптическая задержка.

4. Активность какого-либо тормозящего синапса абсолютно исключает возбуждение данного нейрона в рассматриваемый момент времени.

5. С течением времени структура сети не изменяется.

Наиболее подходящим символизмом для изложения нашей теории является карнаповский "Язык II" [1938], дополненный различными обозначениями из *Principia* [1927] Рассела и Уайтхеда (включая соглашение об употреблении точек) [2]. Для обозначения квантора существования мы используем неперевернутое E, для обозначения импликации – стрелку $\rightarrow$. Мы используем также синтаксические обозначения Карнапа; при этом, однако, готический шрифт заменен жирным. Мы вводим функтор S, значение которого для некоторого свойства P определяется как такое свойство чисел, которое имеет место для всякого данного числа при условии, что P имеет место для предшествующего числа. Функтор S задан соотношением $S(P)\ (t) .\equiv. P\ (Kx)\ .\ t = x'$; скобки в его аргументе часто будем опускать – в таком случае под аргументом понимается ближайшее справа предикатное выражение $[Pr]$. Кроме того, мы пишем $S^2\ Pr$ вместо $S(S(Pr))$ и т.д.

---

1) В оригинале Faci'itation и exitinction. См. цит. книгу Брейзье, стр. 91.–*Прим.ред.*

2) Точки употребляются для обозначения конъюнкции и в роли скобок. Большее число точек означает внешние скобки по сравнению с меньшим. – *Прим.ред.*

Обозначим нейроны данной сети $\mathcal{N}$ через $c_1, c_2, \ldots, c_n$, а свойство чисел "нейрон c_i возбуждается в некоторый момент" (равный числу синаптических задержек от начала отсчета времени) - через N с индексом i, так что $N_i(t)$ означает утверждение "c_i возбужден в момент t". Назовем N_i *действием* нейрона c_i. Иногда мы будем рассматривать индексы при N как принадлежащее предметному языку (the object-language). В качестве функторного аргумента они могут быть заменены числовой переменной $[z]$ и связаны квантором, что позволит нам сокращать длинные (но конечные) дизъюнкции и конъюнкции посредством оператора. Мы будем применять такие выражения всюду, где встречаются последовательности из Pr; этого можно достигнуть с помощью очевидного дизъюнктивного определения. Предикаты $N_1, N_2, \ldots$ образуют синтаксический класс N.

Определим рецепторы[1] сети $\mathcal{N}$, как такие нейроны из $\mathcal{N}$, которые не имеют на себе аксонов. Пусть действия этих нейронов суть $N_1, \ldots, N_p$, действия же остальных нейронов – $N_{p+1}, N_{p+2}, \ldots, N_n$. Тогда *решением* сети $\mathcal{N}$ будет класс высказываний вида $S_i : N_{p+i}(z_1) .\equiv . Pr_i(N_1, N_2, \ldots, N_p, z_1)$, где Pr_i не содержит свободных переменных, кроме z_1, и описательных символов, кроме N, в аргументе $[Arg]$, и, возможно, содержит еще постоянные высказывания $[sa]$, причем каждое S_i верно для $\mathcal{N}$. Обратно, пусть дано некоторое высказывание $Pr_1({}^1p^1{}_1, {}^1p^1{}_2, \ldots, {}^1p^1{}_p, z_1, s)$, не содержащее свободных переменных, за исключением свободных переменных его аргумента. Мы будем говорить, что оно *реализуемо в узком смысле*, если имеется такая сеть $\mathcal{N}$ и в ней такая последовательность N_i, что $N_1(z_1) .\equiv . Pr_i(N_1, N_2, \ldots, z_1, sa_1)$, где sa_1 имеет вид $N(0)$. Назовем такое высказывание *реализуемым в широком смысле* или просто *реализуемым*, если для некоторого k высказывание $S^n(Pr_1)(p_1, \ldots, p_p, z_1, s)$ реализуемо в вышеуказанном смысле. Нейрон c_{p+i} является тогда реализующим нейроном. Мы будем говорить, что два закона нервного возбуждения эквивалентны в узком или широком смысле, если каждое S, реализуемое в каком-либо смысле при допущениях одного закона, реализуемо в соответствующем смысле другой сетью при допущениях другого закона.

В приводимых далее теоремах под реализацией понимается реализация в широком смысле. В некоторых случаях можно получить более точные теоремы о реализации в узком смысле. Однако, помимо того, что это привело бы к усложнению формулировок, получение таких теорем не имело бы большой практической ценности, ибо уровень современной нейрофизиологии позволяет определить закон возбуждения с точностью до эквивалентности в широком смысле, а более точные теоремы принимают различную форму в зависимости от сделанных допущений.

Наши менее точные теоремы инвариантны, однако, по отношению к эквивалентности и являются достаточно удовлетворительными для всех целей, в которых точное время прохождения импульса через всю сеть несущественно.

Мы можем теперь точно сформулировать центральные проблемы: во-первых, найти эффективный метод получения тех S, которые образуют решение заданной сети; во-вторых охарактеризовать эффективным образом класс реализуемых S. Говоря на содержательном языке, проблемы заключаются в определении поведения произвольных сетей и в нахождении сети, имеющей предписанное поведение, если таковая существует.

Назовем сеть *циклической*, если она содержит некоторую петлю: т.е. если в ней существует цепочка $c_i, c_{i+1}, \ldots$ нейронов, каждый член которой имеет аксоны на следующем по порядку нейроне и начало которой совпадает с концом. Если система нейронов $c_1, c_2, \ldots, c_p$ такова, что ее удаление превращает $\mathcal{N}$ в сеть без петель, и если никакая меньшая система нейронов этим свойством не обладает, то эта система называется *циклической*, а число нейронов в ней называется *порядком* $\mathcal{N}$. Как мы увидим далее, порядок сети является в некотором смысле показателем сложности ее поведения. В частности, сети порядка нуль имеют особенно простые свойства; мы рассмотрим их

1) В оригинале peripheral afferents; согласно терминологии, принятой в данном сборнике, в переводе употреблен термин рецепторы. – *Прим. ред.*

в первую очередь.

Определим *временное пропозициональное выражение* (*в.п.в.*), обозначающее *временную пропозициональную функцию* (*в.п.ф.*), путем следующей рекурсии:

1. $p^1[z_1]$ есть *в.п.в.*, где p_1 - предикатное переменное.

2. Если S_1 и S_2 – *в.п.в.*, содержащие одни и те же свободные индивидуальные переменные, то *в.п.в.* будут также выражения SS_1, $S_1 \vee S_2$, $S_1 . S_2$ и $S_1 . \sim S_2$.[1].

3. Ничто другое не является *в.п.в.*

ТЕОРЕМА 1. *Каждая сеть порядка* 0 *может быть решена в терминах временных пропозициональных выражений.*

Пусть c_i – любой нейрон сети $\mathcal{N}$ с порогом $\theta_i > 0$; пусть $c_{i1}, c_{i2}, \ldots, c_{ip}$ имеют на нем соответственно $n_{i1}, n_{i2}, \ldots, n_{ip}$ возбуждающих синапсов и пусть $c_{j1}, c_{j2}, \ldots, c_{jq}$ имеют на нем тормозящие синапсы. Пусть κ_i – система подмножеств из $\{n_{i1}, n_{i2}, \ldots, n_{ip}\}$ таких, что сумма их членов превосходит θ_i. Тогда, в соответствии с вышеупомянутыми допущениями, мы можем написать

$$N_i(z_1) .\equiv. S\left\{\prod_{m=1}^{q} \sim N_{jm}(z_1) . \sum_{\alpha \epsilon \kappa_i} \prod_{s \epsilon \alpha} N_{is}(z_1)\right\}, \tag{1}$$

где $\sum$ и $\prod$ – синтаксические символы для конечных дизъюнкций и конъюнкций. Так как выражение такого вида можно написать для каждого c_i, не являющегося рецептором, то, подставляя в (1) соответствующие выражения для всех N_{jm} и N_{is}, нейроны которых не есть рецепторы, и повторяя этот процесс, мы придем, наконец, к выражению для N_i полностью в терминах рецепторов N, ибо сеть $\mathcal{N}$ не содержит петель. Кроме того, это выражение будет *в.п.в.*, так как (1) есть, очевидно, *в.п.в.* и так как из нашего определения немедленно вытекает, что результат подстановки *в.п.в.* вместо конституэнты $p(z)$ в *в.п.в.* является *в.п.в.*

ТЕОРЕМА 2. *Каждое в.п.в. реализуемо сетью порядка 0.*

Функтор S, очевидно, перестановочен с дизъюнкцией, конъюнкцией и отрицанием. Очевидно также, что результат подстановки всякого S_i, реализуемого в узком смысле (в у. с.), вместо $p(z)$ в реализуемое выражение S_1 является выражением, реализуемым в у. с. Реализующая сеть строится путем замены рецепторов сети для S_1 реализующими нейронами сетей для S_i; сеть из одного нейрона реализует $p_1(z_1)$ в у. с.; рис. 1 изображает сеть[2], реализующую $Sp_1(z_1)$ и, следовательно, SS_2 в у. с., если S_2 может быть реализовано в у. с. Далее, если S_2 и S_3 реализуемы, то $S^m S_2$ и $S^n S_3$ реализуемы в у. с. при подходящих m и n. Этим же свойством обладают поэтому также и $S^{m+n} S_2$ и $S^{m+n} S_3$. Сети рис. 2, 3 и 4 реализуют соответственно $S(p_1(z_1) \vee p_2(z_1))$, $S(p_1(z_1) . p_2(z_1))$ и $S(p_1(z_1) . p_2(z_1))$ в у.с[3]. Значит, $S^{m+n+1}(S_1 \vee S_2)$,

Рис. 1.
$N_2(t) .\equiv. N_1(t-1)$.

1) Значком ~ обозначается отрицание. – *Прим. ред.*

2) На этом и следующих рисунках треугольник изображает тело нейрона, линии — аксоны, жирные точки — возбуждающие концевые пластинки, колечки — тормозящие, цифры в треугольниках — это не пороги нейронов, а просто номера; действие нейрона c_i обозначается N_i, как в тексте. (Ср. обозначения в первой части сборника.) — *Прим. ред.*

3) На этих рисунках порог нейрона принимается равным 2, а условие возбуждаемости такое же, как в статье Клини. См. прим.ред.на стр.73. - *Прим. ред.*

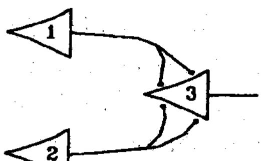

Рис.2.
$N_3(t).\equiv.N_1(t-1) \vee N_2(t-1)$.

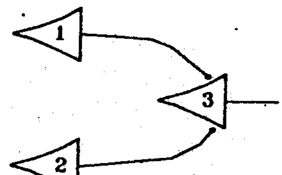

Рис.3.
$N_3(t).\equiv.N_1(t-1).N_2(t-1)$.

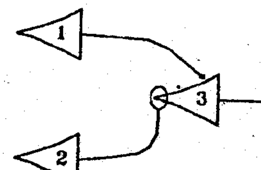

Рис.4.
$N_3(t).\equiv.N_1(t-1) . \sim N_2(t-1)$.

$S^{m+n+1}(S_1.S_2)$ и $S^{m+n+1}(S_1.\sim S_2)$ реализуемы в у. с., а следовательно, $S_1 \vee S_2$, $S_1 . S_2$, $S_1 . \sim S_2$ реализуемы, если реализуемы S_1 и S_2. Полная индукция приводит к заключению, что всякое *в.п.в.* реализуемо. Таким образом, можно считать, что каждая сеть строится из основных элементов рис. 1-4, в точности так же, как соответствующее *в.п.в.* порождается операциями предшествования дизъюнкции, конъюнкции и конъюнктивированного отрицания (conjoined negation) [1].

В частности, для всякого описания состояния, т.е. распределения значений *истинности* и *ложности* действий всех нейронов некоторой сети, за исключением случая ложности действий всех нейронов, можно построить некоторый нейрон, возбуждение которого необходимо и достаточно для справедливости этого описания. Кроме того, всегда существует бесконечно много топологически различных сетей, реализующих произвольное *в.п.в.*

ТЕОРЕМА 3. *Пусть дано некоторое сложное высказывание* S_1, *построенное каким-нибудь образом из элементарных высказываний вида* $p(z_1-zz)$ (*где zz – произвольное число*) *посредством отрицания, дизъюнкции, конъюнкции, импликации и эквивалентности. Тогда* S_1 *есть в.п.в., которое ложно только в случае, если все его конституэнты* $p(z_1-zz)$ *ложны, т.е. заменены ложными высказываниями, или если в последней линии таблицы истинности для* S_1 *содержится F, или же в гильбертовой дизъюнктивной нормальной форме для* S_1 *нет членов, состоящих из одних отрицаемых элементов.*

Три последних условия эквивалентны (см. Гильберт и Аккерман, 1938). По индукции заключаем, что первое из них необходимо, ибо $p(z_1-zz)$ становится ложным после замены его ложным высказыванием, а $S_1 \vee S_2$, $S_1 . S_2$ и $S_1 . S_2$ ложны, если ложны обе их конституэнты. Для доказательства достаточности последнего из этих условий заметим, что дизъюнкция является *в.п.в.*, если таковыми являются ее конституэнты, и что всякий член вида $S_1 . S_2 \ldots S_m . \sim S_{m+1} . \sim \ldots \sim S_n$ можно записать как $(S_1 . S_2 \ldots S_m) . \sim (S_{m+1} \vee S_{m+2} \vee \ldots \vee S_n)$, что, очевидно, представляет *в.п.в.*

Метод последней теоремы в действительности обеспечивает удобную и практичную процедуру для построения требуемой нервной сети в тех случаях, когда в предписанные условия не входят события из неограниченно далекого прошлого. В качестве примера можно рассмотреть ощущение тепла, вызываемое кратковременным охлаждением.

Если на мгновение приложить к коже холодный предмет, а затем убрать его, то возникнет ощущение тепла. Если же его продержать более долгое время, то будет ощущение только холода без предшествующего ощущения тепла, хотя бы непродолжительного. Известно, что одни кожные рецепторы возбуждаются теплом, а другие - холодом. Если N_1 и N_2 - действия соответствующих рецепторов, а N_3 и N_4 - действия нейронов, возбужденность которых влечет ощущения тепла или холода,

1) См. определение в *в.п.в.*, пункт 2. - *Прим.ред.*

то наши требования могут быть записаны так:

$$N_3(t) :\equiv: N_1(t-1) .\mathrm{V}. N_2(t-3) .\backsim N_2(t-2),$$
$$N_4(t) .\equiv. N_2(t-2) .N_2(t-1).$$

где мы предполагаем для простоты, что продолжительность, требуемая для ощущения холода, равна двум синаптическим задержкам, а для ощущения тепла - одной. Эти условия подходят, очевидно, под теорему 3. Можно поэтому построить реализующую их сеть с помощью метода теоремы 2. Сначала запишем их способом, выявляющим их построение из конституэнт посредством операций рис. 1-4, т.е. в виде

$$N_3(t) .\equiv. S\{N_1(t) \vee S[(SN_2(t)) .\backsim. N_2(t)\},$$
$$N_4(t) .\equiv. S\{[SN_2(t)] . N_2(t)\} .$$

Построим, во-первых, сеть для функции, заключенной в наибольшее число скобок, и будем двигаться наружу; в этом случае мы соединим сетью рис.1 нейрон c_2 с некоторым нейроном, скажем, c_a так что

$$N_a(t) .\equiv. SN_2(t).$$

Введем затем две сети указанного на рис.3 и 4 вида, соединяющие c_a и c_2 соответственно с c_4 и c_b. Тогда

$$N_4(t) .\equiv. S[N_a(t) . N_2(t)] .\equiv. S[(SN_2(t))] . N_2(t)],$$
$$N_b(t) .\equiv. S[N_a(t) .\backsim N_2(t)] .\equiv. S[(SN_2(t)) .\backsim N_2(t)] .$$

Наконец, проведем сеть вида, указанного на рис.2, от c_1 и c_b к c_3 и получим

$$N_3(t) .\equiv. S[N_1(t) \vee N_b(t)] .\equiv. S\{N_1(t) \vee S[(SN_2(t))] .\backsim N_2(t)\} .$$

Это - желаемые выражения для $N_3(t)$ и $N_4(t)$; реализующая сеть в целом изображена на рис.5.

Эта иллюзия делает очень ясной зависимость соответствия между ощущением и внешним миром от специфических структурных свойств посредствующей нервной сети. Та же иллюзия могла бы, конечно, быть произведена при различных других предположениях о поведении кожных рецепторов с помощью соответствующих сетей.

Теперь рассмотрим некоторые теоремы эквивалентности, т.е. теоремы, устанавливающие тождественность (если не считать времени) различных законов нервного возбуждения. Разберем сначала случай *относительного торможения*. Под этим мы понимаем предположение о том, что возбуждение тормозящего синапса не исключает абсолютно возбуждения нейрона, но лишь увеличивает его порог, так что для возбуждения нейрона требуется одновременное возбуждение большого числа возбуждающих синапсов, чем было бы нужно в противном случае. Без ограничения общности можно принять, что порог увеличивается на единицу при возбуждении каждого тормозящего синапса.

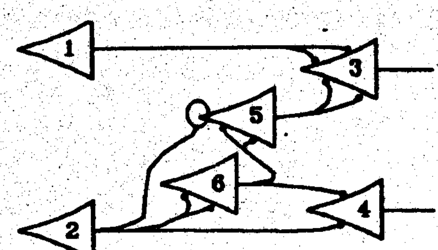

Рис. 5.
$N_3(t):\equiv:N_1(t-1).\mathrm{V}$
$N_2(t-3).\sim N_2(t-2),$
$N_4(t).\equiv.N_2(t-2).N_2(t-1).$

Мы имеем тогда теорему:

ТЕОРЕМА 4. *Относительное и абсолютное торможения эквивалентны в широком смысле.*

Мы можем, используя предположение об относительном торможении, записать закон нервного возбуждения аналогично формуле (1). Рассмотрение полученного выражения показывает тогда, что оно является *в.п.в.* Пример замены относительного торможения абсолютным дан на рис.6. Обратная замена еще проще; мы снабжаем каждый тормозящий аксон, подходящий к c_i, достаточным числом тормозящих синапсов.

Рассмотрим затем случай утомления. Мы можем записать это в виде изменения порога θ_i после возбуждения нейрона c_i.

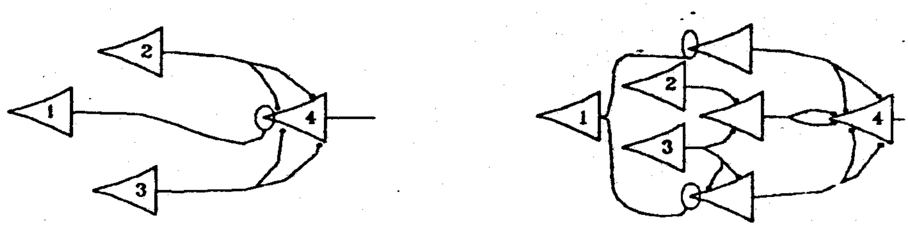

Рис. 6.

$N_4(t):\equiv:.\sim N_1(t-1).N_2(t-1)\vee N_3(t-1)\ .\vee.\ N_1(t-1).N_2(t-1).N_3(t-1).$

$N_4(t):\equiv:\sim N_1(t-2).N_2(t-2)\vee N_3(t-2)\ .\vee.\ N_1(t-2).N_2(t-2).N_3(t-2).$

Изменение порога с точностью до ближайшего целого числа, и только с такой точностью, имеет значение при естественных типах возбуждения, что может быть записано как последовательность θ_i+b_j для j синаптических задержек после возбуждения, где $b_j = 0$ при достаточно больших j, *скажем*, $j \geq M$. Мы можем теперь высказать следующую теорему.

ТЕОРЕМА 5. *Утомление эквивалентно абсолютному торможению.*

Ибо, предположив на время, что имеет место относительное торможение, мы должны лишь провести от нейрона c_i назад к нему M циклов $\mathcal{T}_1$, $\mathcal{T}_2$, . . . , $\mathcal{T}_M$, содержащих соответственно 1,2,...,M нейронов (так что возбуждение каждого звена в цикле достаточно для возбуждения следующего), где конец цикла $\mathcal{T}_j$ имеет точно b_j тормозящих синапсов на c_i. Очевидно, что это обеспечивает желаемый результат. Обратная замена может быть выполнена с помощью диаграммы рис.7. Теорема следует из транзитивности замены. К этой группе теорем принадлежит также хорошо известная

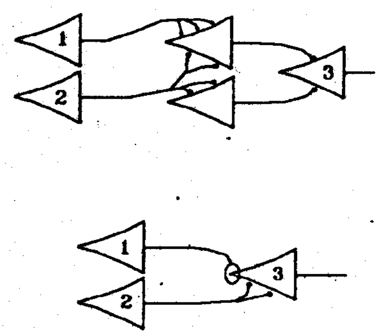

Рис. 7.

$N_3(t).\equiv.N_2(t-2).\ \sim N_1(t-3).$

ТЕОРЕМА 6. *Облегчение и временная суммация могут быть заменены пространственной суммацией.*

Это очевидно; достаточно лишь ввести подходящую последовательность цепочек задержки (с возрастающим числом синапсов) между возбуждающей клеткой и нейроном, на котором хотят иметь временную суммацию. Предположение пространственной суммации даст тогда требуемый результат. См., например, рис.8. Эта процедура показывает, что наблюдаемая в больших сетях временная суммация не обязательно предполагает подобный механизм взаимодействия индивидуальных нейронов.

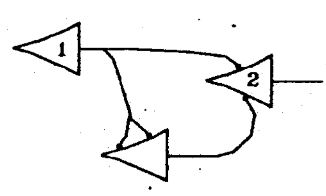

Рис. 8.

$N_2(t).\equiv.N_1(t-1).N_1(t-2).$

Кажется, что явления обучения, имеющие устойчивый характер

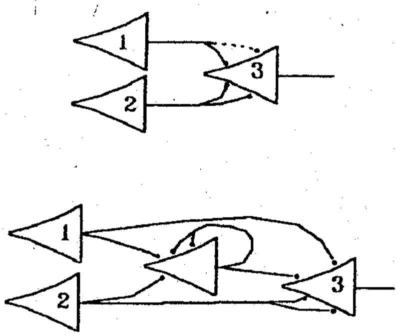

Рис.9.
$N_3(t) :\equiv: N_2(t-1) . \vee . N_1(t-1) . .(Ex)t-1 . N_1(x) . N_2(x)$.

при большинстве физиологических изменений в нервной активности, требуют возможности постоянного изменения структуры сети. Простейшее изменение такого рода - образование новых синапсов или эквивалентное ему понижение порога. Предположим, что некоторые окончания аксонов не могут сначала возбудить следующий нейрон, но если в какой-нибудь момент нейрон возбуждается одновременно с этими окончаниями, то они превращаются в обычные синапсы, способные в дальнейшем возбуждать нейрон. Устранение тормозящего синапса дает совершенно эквивалентный результат. Мы имеем теперь следующую теорему:

ТЕОРЕМА 7. *Изменяемые синапсы могут быть заменены петлями.*

Это выполняется с помощью метода рис.9. Следует также отметить, что нейрон, который становится и остается активным самопроизвольно, может быть аналогичным образом заменен петлей, приводимой в активность посредством одного рецептора в начале активности и тормозимой другим при ее прекращении.

III. ТЕОРИЯ: СЕТИ С ПЕТЛЯМИ

Рассмотрение сетей, не удовлетворяющих нашему предыдущему предположению об отсутствии петель, является гораздо более трудным. В значительной мере это связано с возможностью неограниченной по времени циркуляции активности, сообщенной петле, так что реализуемый предикат Pr может относиться к событиям неограниченно далекого прошлого. Рассмотрим такую сеть $\mathcal{N}$ порядка, скажем, p. Пусть $c_1, c_2, \ldots, c_p$ – циклическая система нейронов из $\mathcal{N}$. Прежде всего совершенно ясно из определения, что каждое N_s из $\mathcal{N}$ может быть выражено как *в.п.в.* от $N_1, N_2, \ldots, N_p$ и от абсолютных рецепторов: решение для $\mathcal{N}$ включает тогда лишь определение выражений для этой циклической системы. Проделав это, получаем множество выражений $[A]$:

$$N_i(z_1) . \equiv . Pr_i[S^{n_{i1}} N_1(z_1), S^{n_{i2}} N_2(z_1), \ldots, S^{n_{ip}} N_p(z_1)], \tag{2}$$

где Pr_i содержит также рецепторы. Теперь, если n есть наименьшее общее кратное чисел n_{ij}, то, подставляя в (3) вместо N_j их эквиваленты в соответствии с (2) и повторно применяя этот процесс достаточное число раз к результату, мы получим S вида

$$N_i(z_1) . \equiv . Pr_1[S^n N_1(z_1), S^n N_2(z_1), \ldots, S^n N_p(z_1)]. \tag{3}$$

Эти выражения могут быть записаны в гильбертовой дизъюнктивной нормальной форме

$$N_i(z_1) . \equiv . \sum_{\substack{\alpha \epsilon x \\ \beta_\alpha \epsilon x}} S_\alpha \prod_{j \epsilon x} S^n N_j(z_1) \prod_{j \epsilon \beta_\alpha} \sim S^n N_j(z_1) \tag{4}$$

для подходящего κ, *где* S_α *есть в.п.в.* от абсолютных рецепторов сети $\aleph$. Существует 2^p различных высказываний, образованных из p высказываний N_i присоединением к конъюнкции некоторого множества высказываний конъюнкции отрицаний остальных. Занумеровав их как $X_1(z_1)$, $X_2(z_1)$, . . . , $X_{2p}(z_1)$, мы можем, используя выражения (4), прийти к равносильному множеству уравнений вида

$$X_i(z_1).\equiv.\sum_{j=1}^{2^p} Pr_{ij}(z_1).S^n X_j(z_1). \tag{5}$$

Теперь переведем индексы i, j в предметный язык, т.е. определим Pr_1 и Pr_2 такие, что $Pr_1(zz_1, z_1).\equiv .X_i(z_1)$ и $Pr_2(zz_1, zz_2, z_1).\equiv.Pr_{ij}(z_1)$ доказуемы всякий раз, когда zz_1 и zz_2 обозначают соответственно i и j. Тогда мы можем переписать (5) в виде

$$(z_1)zz_p{:}Pr_1(z_1,z_3)\ .\equiv.\ (Ez_2)zz_p.Pr_2(z_1,z_2,z_3-zz_n)\ .\ Pr_1(z_2,\ z_3-zz_n) \tag{6}$$

где zz_n обозначает n и zz_p обозначает 2^p. Повторная подстановка приводит к выражению

$$\begin{aligned}&(z_1)zz_p{:}Pr_1(z_1,zz_n,zz_2)\ .\equiv.\ (Ez_2)zz_p(Ez_3)zz_p.\ .\ .\\&.\ .\ .\ (Ez_n)zz_p\ .\ \ Pr_2(z_1,z_2,zz_n(zz_2-1)).\\&.\ Pr_2(z_2,z_3,zz_n(zz_2-1))\ .\ .\ .\ Pr_2(z_{n-1},z_n,0).Pr_1(z_n,0)\end{aligned} \tag{7}$$

для всякого числа zz_2, обозначающего s. С помощью индукции легко показать, что оно равносильно выражению

$$\begin{aligned}&(z_1)zz_p\ :\ .\ Pr_1(z_1,\ zz_nzz_2)\ :\ \equiv\ :\ (Ef)(z_2)zz_2\ -\ 1f(z_2zz_n)\ \le\\&\le\ zz_p\ .\ f(zz_nzz_2)\ =\ z_1\ .\ Pr_2(f(zz_n(z_2\ +\ 1)),\ f(zz_nz_2)\ .\\&.\ Pr_1(f(0),\ 0)\end{aligned} \tag{8}$$

и так как это имеет место для всех zz_2, то верно также, что

$$\begin{aligned}&(z_4)(z_1)zz_p\ :\ Pr_1(z_1,\ z_4)\ .\ \equiv\ .\ (Ef)(z_2)(z_4\ -\ 1)\ .\ f(z_2)\ \le\\&\le\ zz_p\ .\ f(z_4)\ =\ z_1f(z_4)\ =\ z_1\ .\ Pr_2[f(z_2\ +\ 1),\ f(z_2),\ z_2]\ .\\&.\ Pr_1[f(\mathrm{res}(z_4,\ zz_n)),\ \mathrm{res}[z_4,\ zz_n)],\end{aligned} \tag{9}$$

где zz_n обозначает n, res (r,s) есть вычет r по mod s, а zz_p обозначает 2^p. В менее точной форме это может быть записано так:

$$N_i(t).\equiv.(E\varphi)(x)t-1.\varphi(x)\le 2^p.\varphi(t)=i.\ \ P[\varphi(x+1),\ \ \varphi(x).N_{\varphi(0)}(0)],$$

где x и t предполагаются также делящимися на n, а Pr_2 обозначает P.

Из предыдущих замечаний получаем теорему 8.

ТЕОРЕМА 8. *Выражение (9) для нейронов циклической системы некоторой сети $\aleph$ вместе с определенным в.п.в., выражающим действия других нейронов в терминах нейронов этой циклической системы, образует решение для $\aleph$.*

Рассмотрим теперь вопрос о реализации множества из S_i. Первое необходимое условие, легко доказываемое по индукции, состоит в том, что

$$(z_2)z_1.p_1(z_2)\equiv p_2(z_2).\rightarrow.S_i\equiv S_i\begin{Bmatrix}p_1\\ p_2\end{Bmatrix} \tag{10}$$

должно быть верным вместе с аналогичными утверждениями для других свободных p и S_i. Иначе говоря, никакая нервная сеть не может учесть будущих возбуждений рецепторов. Всякое S_i, удовлетворяющее этому требованию, может быть заменено равносильным S вида

$$(Ef)(z_2)z_1(z_3)zz_p\ :\ f\in Pr_{mi}\ :\ f(z_1,\ z_2,\ z_3)\ =\ 1\ .\ \equiv.p_{z3}(z_2), \tag{11}$$

где zz_p обозначает p, если определить

$$\begin{aligned}Pr_{mi} = \hat{f}\ [(z_1)(z_2)z_1(z_3)zz_p\ :\ .\ f(z_1,\ z_2,\ z_3) = \\ = 0\ .\ \vee\ .\ f(z_1,\ z_2,\ z_3)\ .=1\ :\ f(z_1,\ z_2,\ z_3) = \\ = 1\ .\ \equiv.p_{z3}(z_2):\rightarrow:S_i].\end{aligned}$$

Рассмотрим теперь те последовательности классов α_i, для которых

$$\begin{aligned}&N_i(t):\equiv:(E\varphi)(x)t(m)q:\varphi\in\alpha_i:N_m(x)\ .\equiv.\varphi(t,x,m)=1\\ &[i=q+1,\ldots,M]\end{aligned} \tag{12}$$

имеет место для некоторой сети. Такие классы назовем *цепкими*. Определим *булево кольцо*, порожденное некоторым классом классов κ, как такой агрегат этих классов, который может быть образован из членов κ повторным применением логических операций, т.е. положим

$$\mathcal{R}(\kappa)=p'\hat{\lambda}[(\alpha,\beta):\alpha\in\kappa\ \rightarrow\alpha\in\lambda:\alpha,\beta\in\lambda\ .\rightarrow.-\alpha,\alpha\ .\beta,\alpha\vee\beta\in\lambda].$$

Определим также

$$\begin{aligned}&\bar{\mathcal{R}}(\kappa)\ .=.\ \mathcal{R}(\kappa)-\iota'p'-''\kappa,\\ &\mathcal{R}_e(\kappa)=p'\hat{\lambda}\ [(\alpha,\beta):\alpha\in\kappa\rightarrow\alpha\in\lambda.\rightarrow.-\alpha,\alpha\ .\beta,\alpha\vee\beta,S''\alpha\in\lambda]\\ &\bar{\mathcal{R}}_e(\kappa)=\mathcal{R}_e(\kappa)-\iota'p'-''\kappa,\end{aligned}$$

и

$$\sigma(\psi,t)=\hat{\varphi}\ [(m)\ .\ \varphi(t+1,t,m)=\psi(m)].$$

Класс $\mathcal{R}_e(\kappa)$ образован из κ по аналогии с $\mathcal{R}(\kappa)$, но повторным применением не только логических операций, а также операции замены класса свойств $P\ \in\alpha$ на $S(P)\in S''\alpha$. Мы получаем следующую лемму:

ЛЕММА

$Pr_1(p_1, p_2, \ldots p_m, z_1)$ *есть в.п.в. тогда и только тогда, когда*

$$(z_1)(p_1,\dots,p_m)(Ep_{m+1})\ :\ p_{m+1}\in\overline{\mathfrak{R}}_e\ \{p_1,\ p_2,\dots,\ p_m\})$$
$$p_{m+1}(z_1)\ \equiv\ Pr_1(p_1,\ p_2,\dots,\ p_m,\ z_1) \qquad (13)$$

является верным. Это выражение есть в.п.в., не содержащее S, тогда и только тогда, когда оно имеет место при замене $\overline{\mathfrak{R}}_e$ *на* $\overline{\mathfrak{R}}$.

Отсюда

ТЕОРЕМА 9. Последовательность классов $\alpha_1,\alpha_2,\dots,\alpha_s$ является последовательностью цепких классов тогда и только тогда, когда

$$\begin{aligned}&(Em)(En)(p)n(i)(\psi) : .\ (x)m\psi(x) = 0 \vee \psi(x) = 1 :\rightarrow\\ &\rightarrow : (E\beta)(Ey)m\ .\ \psi(y) = 0\ .\ \beta \in \mathfrak{R}[\widehat{\gamma}((Ei)\ .\ \gamma = \alpha_i))\ .\mathrm{V}.\ (x)m\ .\\ &.\ \psi(x) = 0\ .\ \beta \in \mathfrak{R}\ [\widehat{\gamma}((Ei)\ .\ \gamma=\alpha_i)\,] : (t)(\varphi) : \varphi\varepsilon\alpha_i\ .\\ &\sigma(\varphi,nt+p)\ .\rightarrow.\ (Ef)\ .\ f\epsilon\beta\ .\ (w)m(x)t-1.\\ &\varphi(n(t+1) + p,\ nx + p,\ w) = f(nt + p,\ nx + p,\ w)\,.\end{aligned} \qquad (14)$$

Доказательство вытекает непосредственно из леммы. Условие необходимо, поскольку всякая сеть, для которой может быть написано выражение вида (4), очевидно, ему удовлетворяет, если ψ - характеристические функции S_α и для каждой $\psi\,\beta$ является классом, обозначение которого имеет вид $\prod\limits_{i\epsilon\alpha} Pr_i \prod\limits_{j\notin\beta_\alpha} Pr_j$, где Pr_k обозначает α_k для всех k. Обратно, мы можем написать выражение вида (4) для некоторой сети $\mathfrak{N}$, дающее удовлетворяющие соотношению (14) цепкие классы. Для этого берем в качестве Pr_α предикаты Pr, обозначающие ψ, и присоединяем Pr, записанный аналогично для классов в дизъюнктивной нормальной форме и обозначающий α, соответствующее этому ψ. Поскольку каждое S вида (4), очевидно, реализуемо, теорема доказана.

Представляет некоторый интерес рассмотрение того, в какой степени можно, зная настоящее, определить полное прошлое различных специальных сетей, т.е. рассмотрение того, при каких условиях мы можем построить сеть, возбуждение циклической системы нейронов которой требует, чтобы возбуждения рецепторов имели некоторое множество предприсанных заданными функциями φ_i значений. В этом случае классы α_i в последней теореме сводятся к единичным классам, и наше условие может быть преобразовано в

$$\begin{aligned}&(Em,n)(p)n(i,\psi)(Ef) :.\ (x)m : \psi(x) = 0\ .\mathrm{V}.\ \psi(x) = 1 :\\ &\varphi_i \in \sigma(\psi,nt+p) :\rightarrow: (w)m(x)t-1\ .\ \varphi_i\,(n(t+1) +\\ &+ p,\ nx + p,\ w) = \varphi_j(nt + p,\ nx + p,\ w) :.\\ &(u,v)(w)m\ .\ \varphi_i(n(u + 1) + p,\ nu + p,\ w) =\\ &= \varphi_i(n(v + 1) + p,\ nv + p,\ w)\,.\end{aligned}$$

Ввиду недостатка места мы провели предыдущее рассуждение очень схематично. В дальнейшей публикации мы собираемся представить это рассуждение и некоторые его следствия в развернутом виде.

Условие последней теоремы в принципе (но не в деталях) достаточно просто, однако его применение в практических случаях требует исследования некоторых 2^{2^n} классов функций, именно тех, которые являются членами $\mathfrak{R}(\{\alpha_1\ ,\ \dots\ ,\ \alpha_s\})$. Так как каждый из них является возможным β в теореме 9, то результат нельзя усилить, но мы можем получить некоторое достаточное условие реализуемости S, очень легко применяемое и, вероятно, достаточное для большинства практических целей. Оно дается следующей теоремой:

ТЕОРЕМА 10. *Определим некоторое множество* **K** *выражений* **S** *путем следующей рекурсии:*

1. *Всякое в.п.в. и всякое в.п.в., аргументы которого заменены членами из* **K**, *принадлежит* **K**.

2. *Если* $Pr_1(z_1)$ *есть член K, то* $(z_2)z_1 . Pr_1(z_2), (Ez_2)z_1 . Pr_1(z_2)$ и $C_{mn}(z_1) . s$ *принадлежат K, где* C_{mn} *обозначает свойство сравнимости с m по* mod *n, m < n.*

3. *Множество K не имеет других членов.*

Тогда каждый член K реализуем.

Ибо, если $Pr_1(z_1)$ реализуем, то нервные сети, для которых

$$N_i(z_1) . \equiv . Pr_1(z_1) . SN_i(z_1),$$
$$N_i(z_1) . \equiv . Pr_1(z_1) \vee SN_i(z_1),$$

являются выражениями из уравнения (4), реализуют соответственно $(z_2)z_1 . Pr_1(z_2)$ и $(Ez_2) . Pr_1(z_2)$. Простая сеть $c_1, c_2, \ldots, c_n$ с n звеньями, каждое из которых достаточно для возбуждения следующего звена, дает выражение

$$N_m(z_1) . \equiv . N_1(0) . C_{mn}$$

для последней формы. Теорема выводится по индукции.

В заключение следует отметить еще одно обстоятельство. Легко показать, что, во-первых, каждая сеть, снабженная лентой, считывающим устройством, связанным с рецепторами, и подходящими эффекторами для выполнения необходимых моторных операций, может вычислять лишь такие числа, которые вычисляет машина Тьюринга; во-вторых, что каждое из последних чисел может быть вычислено такой сетью и что сети (без считывающего устройства и ленты) с петлями могут вычислять некоторые из вычислимых чисел и никакие другие, но не все из них. Это представляет интерес с точки зрения психологического оправдания тьюринговского определения вычислимости и его эквивалентов, чёрчевской λ - определимости и клинивской общерекурсивности: если какое-либо число может быть вычислено организмом, то оно вычислимо также по этим определениям, и обратно.

IV. СЛЕДСТВИЯ

Причинность, требующая описания состояний и закона необходимой связи между ними, проявляется в различных формах во многих науках, но нигде, за исключением статистики, она не является столь необратимой, как в теории нервной активности. Задание в произвольный момент времени рецепторных возбуждений и активности (удовлетворяющей принципу "все или ничего") всех составляющих нейронов определяет состояние. Задание нервной сети определяет закон необходимой связи, с помощью которого по описанию любого состояния можно вычислить следующее за ним состояние, однако включение дизъюнктивных соотношений не позволяет полностью определить предшествующее состояние. Кроме того, восстанавливающая активность входящих в сеть петель делает связь с прошлым неопределенной. Так, наше знание мира, включая нас самих, неполно в пространственном отношении и неопределенно в отношении времени. Это не знание, касающееся неявно всех наших умственных способностей, является обратной стороной абстракции, делающей наше знание полезным. Роль умственных способностей при определении эпистемологической связи наших теорий с нашими наблюдениями и наших наблюдений с фактами совершенно ясна, ибо очевидно, что каждая идея и каждое ощущение реализуются активностью внутри нервной сети и что действительные возбуждения рецепторов не определены полностью никакой такой активностью.

Не имеется никакой теории или наблюдения, которые могли бы сохранить нечто большее, кроме их дефектного отношения к фактам, если сеть изменяется. Появляются звон в ушах, мурашки, галлюцинации, иллюзии, смешение ощущений и дезориентация. Опыт, следовательно, подтверждает, что если наши сети не определены, то неопределенными являются и наши факты, и "реальности" мы не можем приписать ничего бóльшего, чем одно качество или "форму". С определением сети непознаваемый объект знания "вещь в себе", перестает быть непознаваемым.

В психологии, как бы она ни определялась, описание сети дало бы все, что может быть достигнуто в этой области, даже если анализ дошел бы до конечных психических единиц или "психонов", ибо психон не может быть ничем меньшим, чем активностью отдельного нейрона. Так как эта активность по своей природе пропозициональна, то все психические события имеют преднамеренный, или "семиотический", характер. Закон "все или ничего" этой активности и соответствие ее соотношений соотношениями логики предложений обеспечивают то, что соотношения психонов суть соотношения двузначной логики предложений. Следовательно, в психологии, интроспективной, бихэвиористской или физиологической, основными являются соотношения двузначной логики.

Отсюда возникают конструктивные решения холистических проблем, включающих в себя дифференцированный континуум чувственных ощущений и нормативные, совершенствующие и разрушающие свойства восприятия и исполнения. Из необратимости причинности следует, что, даже если сеть известна, то, хотя по настоящей активности мы можем предсказать будущее, мы не можем определить ни афферентное по центральному, ни центральное по эфферентному, ни прошлое по настоящей активности. Эти заключения подкрепляются фактами существования противоречивых свидетельств очевидцев, трудностью дифференцированного диагностирования органических больных, истерики и симуляции, и сравнением памяти и воспоминаний с записями. Более того, системы, которые реагируют на различие между афферентами регенеративной сети и некоторой активностью в этой сети так, что уменьшают это различие, обнаруживают целевое поведение. Известно, что организмы обладают многими такими системами, обслуживающими гомеостазис, желание и внимание. Таким образом, как формальный, так и конечный аспекты этой активности, которую мы обычно называем *умственной*, строго выводимы из современной нейрофизиологии. Психиатр может найти утешение в очевидном заключении, касающемся причинности, именно, что для прогноза история никогда не необходима. Он может извлечь немногое из того равным образом справедливого вывода, что наблюдаемое им объяснимо лишь в терминах нервной активности, бывшей до последнего времени вне его кругозора. Центральным моментом этого незнания является неоднозначность перехода от произвольного образца видимого поведения к нервным сетям, тогда как из воображаемых сетей существует фактически только одна, и она может в любой момент обнаружить непредвиденную активность. Разумеется, для психиатра большее значение имеет то обстоятельство, что в таких системах "разум" уже не бродит "более призрачно, чем призрак". Напротив, расстройство ума можно изучать, без потери общности или строгости, в научных терминах нейрофизиологии.

В нейрологии теория нервных сетей заостряет различие между сетями, необходимыми или только достаточными для заданной активности, выясняя, таким образом, соотношения между нарушенной структурой и нарушенным функционированием. В собственной области этой теории различие между эквивалентными сетями и сетями, эквивалентными в узком смысле, указывает на подходящее использование и на важность изучения нервной деятельности во времени. Математической биофизике эта теория доставляет некоторый способ строгой символической трактовки известных сетей и легкий метод конструирования гипотетических сетей с требуемыми свойствами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Carnap R., 1938, The Logical Syntax of Language, New York: Harcourt, Brace and Company.

2. Hilbert D. and Ackermann W., 1927, Grunduge der Theoretischen Logik, Berlin: J. Springer. Русский перевод "Основы теоретической логики", Издательство иностранной литературы, М., 1947.

3. Russell B. and Whitehead A.N., 1925, Principia Mathematica, Cambridge: Cambridge University Press.

Оригинал статьи:

McCalloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity.
// *Bull. Math. Biophys.* – 1943. – v.5. – pp.115–133.

Русский перевод

- первоначальная публикация:

  Мак-Каллок У.С., Питтс В. Логическое исчисление идей, относящихся к нервной активности // В сб.: «Автоматы» под ред. *К.Э. Шеннона* и *Дж. Маккарти*. – М.: Изд-во иностр. лит., 1956. – с.363–384.

- перепечатки:

  В журнале «Нейрокомпьютер. – 1992. -- № 3, 4. – с.40–53.

  В сборнике «Нейронные сети: История развития теории» / Под ред. *А.И.Галушкина* и *Я.З.Цыпкина*. – М.: ИПРЖР, 2001. – 840 с. – (Серия «Нейрокомпьютеры и их применения». Кн. 5). – с.5–22.

Текст статьи воспроизведен по перепечатке в журнале «Нейрокомпьютер»; подстраничные примечания (Прим. ред.) – из сборника «Автоматы».