

Информационная ёмкость мозга человека.

Хотя сегодня о мозге и его строении известно очень много, но на главный вопрос: «Как работает мозг?» пока нет ответа. Сегодня мозг представляется чёрным ящиком, на вход которого через рецепторы – органы чувств поступают сигналы, отображающие обстоятельства внешнего мира, в которых и находится организм с управляющим мозгом. Понятно, что на функционирование мозга влияют и обратные связи различной глубины через текущее физическое состояние всего организма в целом и мозга в частности, а также через сложившуюся к данному моменту структуру мозга, в которой отображён предыдущий опыт индивидуума в виде неких логических связей между элементами мозга.

До сих пор при рассмотрении логики функционирования мозга мы вынуждены были говорить о мозге, как о чёрном ящике, поскольку не было модели его функционирования, не было обоснованных представлений даже о принципах работы мозга, и, тем более, о деталях его функционирования. В данной работе мы попытаемся разобраться в структуре или хотя бы в принципах функционирования этого, до сих пор, чёрного ящика.

На сегодня известно, что мозг состоит из большого количества отдельных логических элементов-нейронов. Каждый нейрон может возбуждаться (активизироваться) сигналами, поступающими на его входы с выходов других нейронов, непосредственно связанных с ним. Возбудившись, этот нейрон некоторое время пребывает в возбуждённом состоянии и передает возбуждение через свои выходы на входы следующих логических элементов-нейронов. С точки зрения понимания логики работы мозга ясно, что на уровне отдельного элемента-нейрона не имеет значения, каким именно образом (механически, химически или электрически) реализованы связи и как именно осуществляют анализ входных сигналов эти логические элементы-нейроны. Главное – понять, какая логическая функция реализована на данном нейроне или на группе нейронов. Поэтому мы не будем уделять особого внимания вопросам конкретного устройства и функционирования отдельных логических элементов мозга – нейронов (их физиологии), а сосредоточимся на логике взаимодействия, на принципах их совместного функционирования, обеспечивающего адекватный ответ организма на складывающиеся конфигурации сигналов от входных рецепторов. Примеры же, для простоты, будем рассматривать в терминах электрических схем.

Прежде, чем говорить о возможном устройстве мозга, оценим информационную ёмкость мозга человека. Для этого воспользуемся некоторыми достаточно надёжными экспериментальными данными о мозге человека, существующими на сегодняшний момент. Для оценки информационной ёмкости мозга человека нам надо знать следующее:

- нейроны связаны между собой – выход (аксон) предыдущего нейрона соединен с входами (дендритами) следующих нейронов,
- N – количество нейронов в головном мозге,
- L – среднее количество входов у одного нейрона,
- R – среднее количество нейронов, с которыми может связаться нейрон через один из своих дендритов; определяется средней длиной дендритов и аксонов, их топологии,
- D – число различных значений логического веса связи между нейронами.

Отметим, что выход нейрона (аксон) представлен в единственном числе, хотя его единственность и не существенна для нашего рассмотрения. Множество всех остальных имеющихся на сегодня сведений о мозге человека, как экспериментальных фактов (результатов измерений), так и представлений (результатов рассуждений), мы пока не будем рассматривать.

Сделаем естественное предположение, что информация в мозге отображается путём установления связей между нейронами головного мозга. Вообще-то, по большому счёту, это предположение и предположением-то нельзя назвать. Можно сказать, что это уже устоявшееся и подтверждённое [2] представление.

Примем пока, что выходы нейронов работают не в аналоговом, а в чисто цифровом режиме, т.е. на выходе нейрона (логического элемента) сигнал или есть (уровень сигнала

равен 1), или его нет (уровень сигнала равен 0). То есть, считаем, что сигналы с уровнями 0.25, 0.5, 0.75 и т.д, на выходах нейронов не имеют места.

В то же время, как показывает эксперимент, по входу нейрон ведет себя как аналоговое пороговое устройство. То есть, входы нейронов имеют различные веса, что эквивалентно различию их электрических сопротивлений, меняющихся со временем. Так что одинаковые по величине сигналы, приходящие на разные входы одного и того же нейрона, имеющие разные веса, вызывают несколько различающуюся реакцию этого нейрона. Различие весов различных связей несет некую информацию. Информационная ёмкость веса такой связи определяется количеством различимых значений веса связи. Если веса связей неразличимы, то информация в весах этих связей равна нулю. Если можно различить 2, 4, 8, ... 1024 состояния веса связи ($2^1, 2^2, 2^3, \dots 2^{10}$), то значение веса этой связи несет в себе, соответственно, 1, 2, 3 ... 10 бит информации. На сегодня неизвестно, какова информационная ёмкость одного входа нейрона за счёт различия весов связей. В технике для оцифровывания аналоговых сигналов обычно используется порядка 12 двоичных разрядов, иногда 16 двоичных разрядов (бит). Предположим, что природа достаточно близка к техническому оптимуму, и количество различимых весов связи $D = 4096 = 2^{12}$. То есть, информативность веса связи равна 12 бит.

Примем, в соответствии с имеющимися на сегодня лабораторными данными, что в человеческом мозге содержится $N=15$ миллиардов нейронов ($1.5 * 10^{10}$). У каждого из этих N нейронов имеется $L=10\ 000 = 10^4$ входов – дендритов и один выход – аксон [3]. Каждый вход-дендрит может быть связан с одним аксоном. Средняя длина дендрита около 1 мм. Тогда как аксоны имеют длину в сотни миллиметров.

Каждый из N нейронов посредством каждого из своих L входов – дендритов может быть связан с некоторыми L нейронами из числа R близлежащих нейронов, в том числе, и с самим собой или с каким-то нейроном через несколько входов. Пусть каждый нейрон может связаться через один из своих входов (длиной 1 мм) с одним из своих соседей – нейронов, находящихся в пределах досягаемости для дендритов данного нейрона, то есть, расположенных внутри сферы с радиусом, равным длине дендрита $r = 1$ мм. Объём этой сферы $V = (4\pi/3) * r^3 \approx 4.2$ мм³, и в нем находится в среднем около 42 000 нейронов. Тогда как все $15*10^9$ нейронов располагаются в объёме всего мозга, приблизительно равном $1.5 * 10^6$ мм³ (1500см³). Таким образом, в пределах досягаемости дендритов рассматриваемого нейрона расположено около 42 000 нейронов-соседей (самих ядер – сом нейронов). Но дендриты контактируют с аксонами, простирающимися на сотни миллиметров от своего ядра. Так что можно смело сказать, что нейрон через каждый из своих входов может связаться более чем с 80 000 других нейронов, т.е. $R > 80\ 000$.

Подсчитаем теперь, какое количество состояний, различающихся той или иной конфигурацией связей между нейронами, может иметь человеческий мозг. Для этого изобразим схематически нейроны мозга и связи между ними (Рис 1).

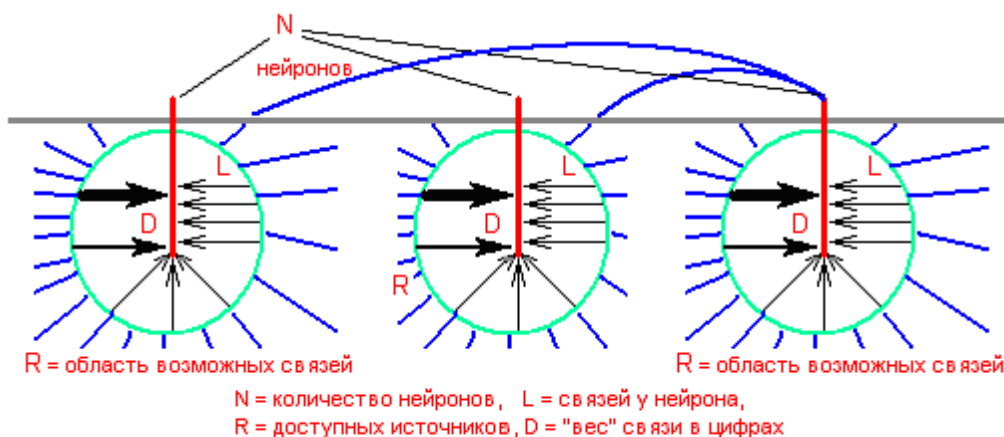


Рис 1
Информационная емкость мозга

Произвольный нейрон через один из своих входов может установить с одним из R соседей связь, имеющую одно из 4096 возможных значений логического веса этой связи. То есть, каждая связь нейрона может находиться в одном из 320 000 000 состояний ($R * D = 80\,000 * 4096 \approx 2^{16.3} * 2^{12}$).

Так что при установлении связи через первый рассматриваемый вход (из L) с одним из R нейронов (или при неустановлении) рассматриваемый нами нейрон с учетом логического веса связи может реализовать один из $(R * D)$ вариантов связей. Второй вход этого же нейрона также может быть связан с одним из R нейронов (через связь с одним из D весов). Видим, что при задействовании двух входов может быть реализовано $(R * D) * (R * D)$ вариантов соединений данного нейрона с другими. При задействовании следующего (третьего) входа может быть реализовано уже $(R * D) * (R * D) * (R * D) = (R * D)^3$ вариантов. Так что при задействовании всех L входов рассматриваемый нейрон может иметь одну из $(R * D)^L$ конфигураций связей через свои входы с другими нейронами. Точно так же каждый из $(N-1)$ оставшихся нейронов может иметь одну из $(R * D)^L = Z^L$ конфигураций входных связей независимо от конфигураций связей других нейронов. Что в итоге даёт трудно вообразимое количество M возможных конфигураций связей между нейронами системы под названием «мозг человека», состоящей из N нейронов, каждый из которых имеет L входов, а для каждого входа доступно $(R * D)$ вариантов соединений:

$$\begin{aligned} M &= (Z^L) * (Z^L) * (Z^L) * \dots * (Z^L) = (Z^L)^N = ((3.2 * 10^8)^{10\,000})^{15\,000\,000\,000} \\ &= ((3.2)^{(10\,000 * 15\,000\,000\,000)}) * (10^{(8 * 10\,000 * 15\,000\,000\,000)}) \\ &= ((3.2)^{150\,000\,000\,000\,000}) * (10^{1\,200\,000\,000\,000\,000}) \\ &> 10^{75\,000\,000\,000\,000} * 10^{1\,200\,000\,000\,000\,000} \\ &> 10^{1\,275\,000\,000\,000\,000} \text{ конфигураций!} \end{aligned}$$

Полученное количество конфигураций можно представить себе намного проще (привычнее в сегодняшнем мире), если сказать, что для представления такого количества конфигураций системы (для нумерации этих конфигураций) нужно иметь W двоичных разрядов – бит. Для определения количества бит, необходимых для указания на одну из этих возможных M конфигураций, для адресации одной из этих конфигураций, надо взять логарифм по основанию 2 от этого числа M.

То есть, количество информации, которое способен вместить в себя человеческий мозг за счёт реализации тех или иных вариантов конфигурации связей между нейронами,

$$\begin{aligned} W &= \log_2 M = \log_2 (Z^L)^N = \log_2 ((R * D)^L)^N = N * L * (\log_2 R + \log_2 D), \\ &\text{или} \\ W &= \log_2 M = N * \log_2 (R * D)^L = N * I, \end{aligned}$$

Здесь через I мы обозначили среднее количество информации, которое может быть зафиксировано (размещено) в одном нейроне.

$$I = \log_2 (R * D)^L = L * \log_2 (R * D) = 10\,000 * \log_2 320\,000\,000 \approx 10\,000 * 28 \text{ бит.}$$

Легко наглядно показать, что информационная ёмкость одного нейрона именно такая. Для этого отметим, что каждая из $L=10\,000$ связей рассматриваемого нейрона установлена с одним из $R=80\,000$ нейронов (связь указывает на один из R нейронов), каждый из которых как раз и адресуется приблизительно 16 битами ($2^{16} \approx 64 * 10^3$). Кроме того, информационная ёмкость веса каждой связи равна 12 битам, что соответствует 4096 различимых значений веса связи.

Чтобы убраться от возражения против учета информативности веса связи (за неимением измеренных параметров), примем пока, что информационная ёмкость каждой связи – входа нейрона определяется только возможностями адресации одного из 80 000 нейронов и составляет всего лишь 16 бит. То есть, $I \approx 10\,000 \text{ связей} * 16 \text{ бит/связь} = 160\,000 \text{ бит}$.

Поделим количество бит на 8, получим количество байт:

$I \approx 20\,000$ байт = 20 Кбайт,

Так что информационная ёмкость всего мозга $W = N * I$ составляет не менее

$W = N * I = (15 * 10^9) * 20\,000 = 300 * 10^{12}$ байт = 300 терабайт!

И это без учета весов связей! А с учетом весов связей $I \approx 35$ Кбайт, $W \approx 500$ терабайт.

Если принять, что на одной бумажной странице размещается 6 Килобайт информации, а 1000 страниц составляют один том (книгу), то ёмкость мозга человека (300 терабайт) составляет приблизительно пятьдесят миллионов (50 000 000) таких тысячестраничных томов! Если мысленно поставить все эти тома, каждый толщиной порядка 3 см, на полку, то длина этой воображаемой книжной полки составит 1 500 км! Если бы человек прочитывал каждый день по одной такой книге, то за год он прочитал бы 365 томов примерно с 10 метров, так что за 100 лет были бы прочитаны книги примерно с 1 км этой воображаемой книжной полки. Конечно же, человек воспринимает информацию с гораздо большей скоростью, чем 1000 страниц в день.

Трудно представимое число ($300 * 10^{12}$ байт) для наглядности можно свести ещё к чему-нибудь, привычному на сегодняшний день. Предположим, что каждый день в мозге человека с предельной точностью фиксируется порядка $5 * 10^9$ байт = 5 Гигабайт, что составляет приблизительно 4 часа фильмов на DVD. Для фиксации такого количества информации мозг должен был бы воспринимать её непрерывно в течение суток (86400сек) со средней скоростью порядка 60 килобайт в секунду, что соответствует установлению приблизительно 30 000 новых связей между нейронами мозга за одну секунду.

Информационная ёмкость каждой связи (без учета её логического веса) равна приблизительно 2 байта = 16 бит адресации одного из 80 000 нейронов, связывающегося посредством этой связи с нашим рассматриваемым нейроном. Так что $60\,000$ (байт/сек) / 2 (байта/на одну связь) $\sim 30\,000$ (связей/сек). Эти 30 000 связей соединяют множество пар нейронов последовательно, в цепочки, а также параллельно, отображая мозаику множества свойств объекта, попавшего в «поле зрения» мозга через входные рецепторы. Можно сказать, что эти 30 000 связей, установившихся между многими нейронами, эквивалентны установлению всех связей 3 нейронов (у каждого 10 000 связей) в секунду.

При таком предположенном темпе фиксации информации мозг человека будет полностью заполнен (установятся все возможные связи) примерно за 60 000 дней ((ёмкость мозга $\approx 300 * 10^{12}$ байт) / $5 * 10^9$ (байт в день)). Или за 160 лет (точнее, 164).

Понятно, что мы запоминаем в день гораздо меньше 5 Гигабайт информации. Мозг наш не работает с механической точностью. С одной стороны, вполне возможна ситуация, когда одна и та же информация многократно дублируется (устанавливается множество параллельных связей). С другой стороны, какая-то информация утрачивается, например, из-за того, что какие-то фрагменты картины окружающей действительности не дошли до места фиксации, или дошли, но не были зафиксированы, или были зафиксированы, но потом разрушились. Именно поэтому об одном и том же событии 10 свидетелей сообщают 10 различных версий.

Видим, что вычисленная нами информационная ёмкость мозга приблизительно соответствует нашим интуитивным представлениям об объёме человеческой памяти.

Отметим, что все цифры, полученные в этой главе, являются оценочными, демонстрирующими, в основном, методику расчёта. Но кроме методики, они позволяют также судить в меру достоверности использованных экспериментальных данных о порядке величины объёма нашей памяти и скорости восприятия информации человеком.

Можно, конечно, заявить о возможной неразличимости некоторых конфигураций идентичных связей нейронов, связанной с нумерацией их входов-дендритов. И поэтому информационная ёмкость каждого нейрона, определяемая количеством возможных конфигураций связей, меньше, чем было принято выше, по той причине, что порядок, в котором различные дендриты одного нейрона связаны с выходами других нейронов, не имеет значения. Если это имеет место, то из комбинаторики следует, что вариантов конфигурации связей или реально различимых состояний каждого нейрона в $L!$ (L факториал) раз меньше,

чем мы подсчитали. Так что информационная ёмкость одного нейрона I будет равна не 35 Кбайт, а на $\log_2(L!)$ бит меньше. Воспользовавшись асимптотической формулой Стирлинга для значения факториала

$$L! \approx (2\pi L)^{1/2} (L/e)^L,$$

где e – основание натурального логарифма, получаем

$$\Delta I = -\log_2(L!) / 8 = -15\,000 \text{ байт},$$

То есть, если возможные состояния нейрона (конфигурации его связей) неразличимы при замене одного его входа-дендрита на другой, мы должны были бы принять информационную ёмкость одного нейрона равной приблизительно 20 Кбайт (35Кб-15Кб), что составляет 57% от значения, полученного ранее.

Однако по поводу того, что состояния нейрона, различающиеся только «номерами» дендритов, нужно считать одинаковыми, неразличимыми, надо сказать следующее: дендриты не могут быть идентичными, уже хотя бы потому, что логические веса связей – дендритов различны. То есть, длины, а также электрические характеристики разных дендритов (время задержки, электрическое сопротивление и т.д.) различны. И поэтому состояния нейрона, различающиеся порядком соединения двух дендритов с двумя другими нейронами, существенно различаются. Да и вообще, весь мозг вряд ли можно считать чисто цифровым устройством с двумя возможными состояниями уровней сигналов (0 или 1) и на входах, и на выходах всех составных элементов. Мозг, скорее всего, эквивалентен гигантской логической схеме, реализованной в виде аналоговой (по входам) электрической схемы с очень изменчивыми порогами срабатывания элементов, составляющих её. Хотя сигналы на аксонах–выходах нейронов имеют при этом цифровой характер. То есть, электрические потенциалы на выходах имеют всего два значения: «0» или «1». Аналоговая, даже только по входу, электрическая схема по сравнению с дискретной, цифровой имеет существенно большее количество возможных состояний каждого элемента и всей схемы – нейрона и мозга в целом, хотя имеет при этом существенно меньшую устойчивость, повторяемость, воспроизводимость результатов.

На примере обсуждённой возможной неразличимости некоторых конфигураций связей между нейронами, видим, что, в принципе, возможны какие-то уточнения оценки информационной ёмкости мозга. Но в этом уточнении размером в десятки процентов нет особого смысла, поскольку экспериментальные оценки количественных характеристик мозга имеют разброс в разы, в сотни процентов.

Так, некоторые источники утверждают, что N – количество нейронов в головном мозге человека – намного больше, чем 15 миллиардов – до 100 миллиардов [4]. И каждый из них может иметь до 20 000 связей с другими нейронами, что примерно в 12 раз увеличивает информационную ёмкость мозга $W \approx 300 \cdot 10^{12}$ байт, вычисленную в соответствии с нашими допущениями. К тому же, как мы увидим позже, следует непременно учитывать различие логических весов связей между нейронами. Этот учет приводит к увеличению вычисленной нами выше при $N = 15 \cdot 10^9$ и $L = 10\,000$ информационной ёмкости мозга до $500 \cdot 10^{12}$ байт или даже больше.

Так что не будем ничего уточнять, а примем пока, что информационная ёмкость каждого из 15 миллиардов нейронов составляет 20 Кбайт. Иначе, если мы начнём уточнять, то утонем в деталях. Придётся говорить и о пороге чувствительности входов различных нейронов, и об изменении этого порога в зависимости от различных обстоятельств, как внутренних, так и внешних, а также и о других деталях, пусть даже очень существенных. А такое отклонение от главной темы не будет способствовать пониманию нами сути работы нашего мозга.

Итак, мы подсчитали количество состояний мозга, различающихся конфигурациями связей между нейронами. Если запоминание в мозге происходит не за счёт установления связей между нейронами, а за счёт чего-то другого (что сомнительно), то информационная ёмкость мозга не станет меньше подсчитанной нами выше, вытекающей из количества различимых состояний мозга (количества возможных конфигураций связей между

нейронами). Эти состояния мозга различаются, тем самым несут информацию, хотя мы можем и не знать, как её извлечь и как ею воспользоваться.

Конечно, можно сказать, что сама по себе некоторая конфигурация связей между нейронами мозга в информационном смысле подобна конфигурации контактов между отдельными песчинками в куче песка, то есть, совершенно бессмысленна и бесполезна. Сказать о том, что в конфигурации связей нейронов содержится полезная для организма информация, можно лишь тогда, когда будет показано, что существуют механизмы записи (фиксации), чтения (воспроизведения) и использования этой информации, фиксируемой в виде определённой конфигурации связей между нейронами мозга в нашем случае. Ещё лучше, если эти механизмы будут известны и промоделированы. Эти механизмы записи, воспроизведения и полезности описаны в последующих главах.

То, что связи между нейронами действительно содержат актуальную информацию, подтверждает экспериментальный факт, состоящий в том, что через межнейронные связи нейроны возбуждают друг друга, так что каждый сигнал (раздражение, мысль) проходит по тому или иному пути, определяемому конфигурацией связей между нейронами. Это и есть прямое доказательство того, что в конфигурации связей между нейронами отображена информация. Причём эта информация совершенно точно задействована в функционировании организма – путь прохождения сигнала через ту или иную цепочку связанных нейронов, вне всякого сомнения, самым существенным образом влияет на функционирование организма. Поскольку возбуждённые на том или ином участке траектории сигнала нейроны в конечном итоге управляют соответствующими мышцами и подсистемами-органами. В свете сказанного становится очевидным, что в конфигурации межнейронных связей отображена (зафиксирована) жизненно важная информация, проявляющаяся (считываемая) в момент прохождения сигнала по той или иной цепочке нейронов в зависимости от конфигурации возбуждающих сигналов.

Другое дело, что на сегодня пока неизвестно, как эта информация отображается, записывается (фиксируется), каков механизм прокладывания связей между нейронами. Ниже, в главах «Эволюция организмов», «Мозг – орган предвидения» и «Принципы функционирования мозга» мы опишем (представим) возможный способ возникновения таких связей между нейронами, то есть, покажем, каким именно образом жизненно важная для организма информация может фиксироваться в связях между нейронами.

Некоторое представление о принципах установления связей между парами нейронов мы можем получить чисто логически, исходя из самых общих соображений. Физической возможностью установления такой связи является близость нейронов, определяемая геометрией их расположения. Поскольку связи парные (каждая связь соединяет только два нейрона), то для их установления имеет значение только состояние именно этих двух нейронов.

Рассмотрим пример. Пусть в мозге имеется несколько нейронов (А, В, С, D, E, F), отображающих следующие объекты-события внешнего мира:

А = на улице А состоялась,	D = демонстрация,
В = на улице В состоялась,	E = прогулка слона,
С = на улице С состоялась,	F = финиш ралли.

В принципе, между ними могут образоваться любые парные связи из числа $6!/2=15$ возможных (ненаправленных). В данном случае нас интересует установление одной из 9 связей: AD, AE, AF, BD, BE, BF, CD, CE, CF.

Связи АВ, АС, ВС, DE, DF, EF представляют несколько другие проекции событий и в данном случае нас не интересуют.

Пусть в какой-то момент времени устанавливается одна из связей, отображающая реальную связь между событиями, имеющими место в данный момент, скажем,

AE = (на улице А состоялась)•(прогулка слона).

То есть, в тот момент, когда одновременно были возбуждены два нейрона, отображающие события А и Е, между ними образовалась связь. Тогда как другие

допустимые, возможные связи, не установились, поскольку не было такого составного события, чтобы одновременно были возбуждены А и F, или А и D, В и D и так далее. Из этого рассмотрения делаем предварительный вывод, что из принципиально возможных связей между двумя нейронами устанавливаются только те, и только в тот момент, когда оба эти нейрона возбуждены. Иначе очень быстро, при первых же возбуждениях нейронов, или даже, вообще, без возбуждения, сами по себе, без всякой связи с реальными событиями образовались бы все допустимые по географическому расположению нейронов связи, в своём подавляющем большинстве не отражающие реальных событий. И, тем самым, связи уже не несли бы в себе информации, отображающей действительность.

Можно утверждать, что именно связи между нейронами являются главным носителем информации, накопленной в мозге человека. Этот вывод вытекает уже из того факта, что любая возможность, любой механизм требует каких-то ресурсов, затрат. Ресурсы организма вполне ограничены, а ему для успешного своего функционирования необходимо иметь самые разные возможности. И, если какая-то функция – возможность в организме уже реализована, то в случае дублирования этой функции у организма может не хватить ресурсов на другие возможности. Поэтому в организме, как и в любой самоорганизующейся системе, устанавливается баланс между затратами и полученными (имеющимися) возможностями (выгодами, полезностью). А поскольку на нейроны человеческого мозга и связи между ними затрачено около 1.5 кг, что составляет не менее 1.5% массы человека, то на другие виды памяти, на дублирование функции памяти, у организма уже просто нет ресурсов. Остальная масса человеческого организма, кроме 1.5 кг мозга, пошла на реализацию других необходимых систем жизнеобеспечения: движения, энергоснабжения (питания), доставки питательных веществ к различным системам организма и отвода от них использованных веществ, терморегулирования и т.д.