

Научно-практическая конференция  
«Теория развития: дифференционно-интеграционная  
парадигма»

Москва, МГППУ, 24-25 февраля 2009 г.

# ОНТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ И ИНВОЛЮЦИЯ КОГНИТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ МОЗГА: НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД

*А.Т. Терехин, Е.В. Будилова, М.П. Карпенко, Л.М.  
Качалова, Т.Г. Савко, Е.В. Чмыхова*

Биологический факультет МГУ

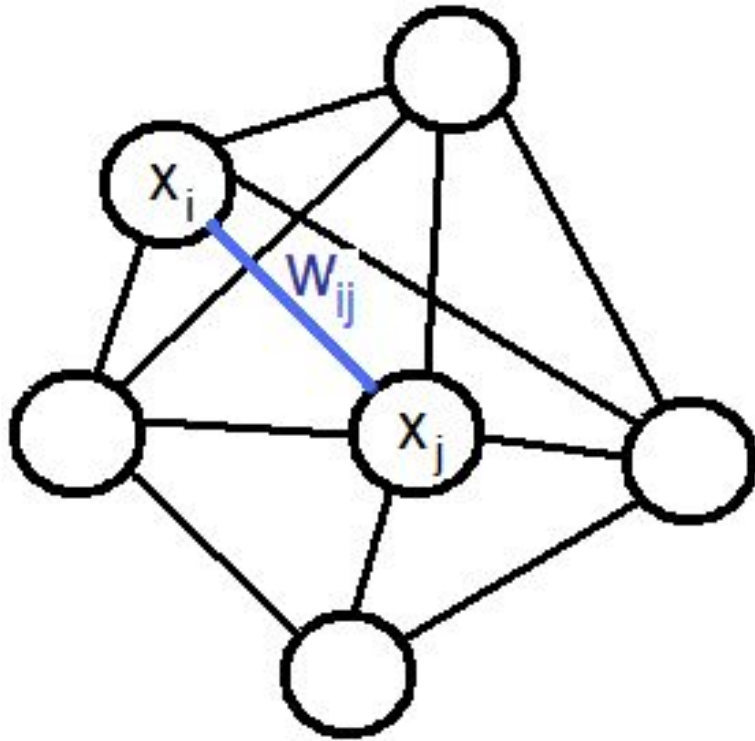
Институт когнитивной нейробиологии СГА

**Каковы общие возрастные тенденции изменения характера когнитивной деятельности и физиологии человека?**

**В данном сообщении мы пытаемся ответить на эти вопросы, рассматривая мозг как динамическую систему - сеть взаимодействующих друг с другом нейронов и анализируя свойства ее функции Ляпунова.**

# Нейронная сеть Хопфилда

Hopfield J.J. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons. *PNAS*, 1984, v. 81, 3088–3092.



Динамика состояний:

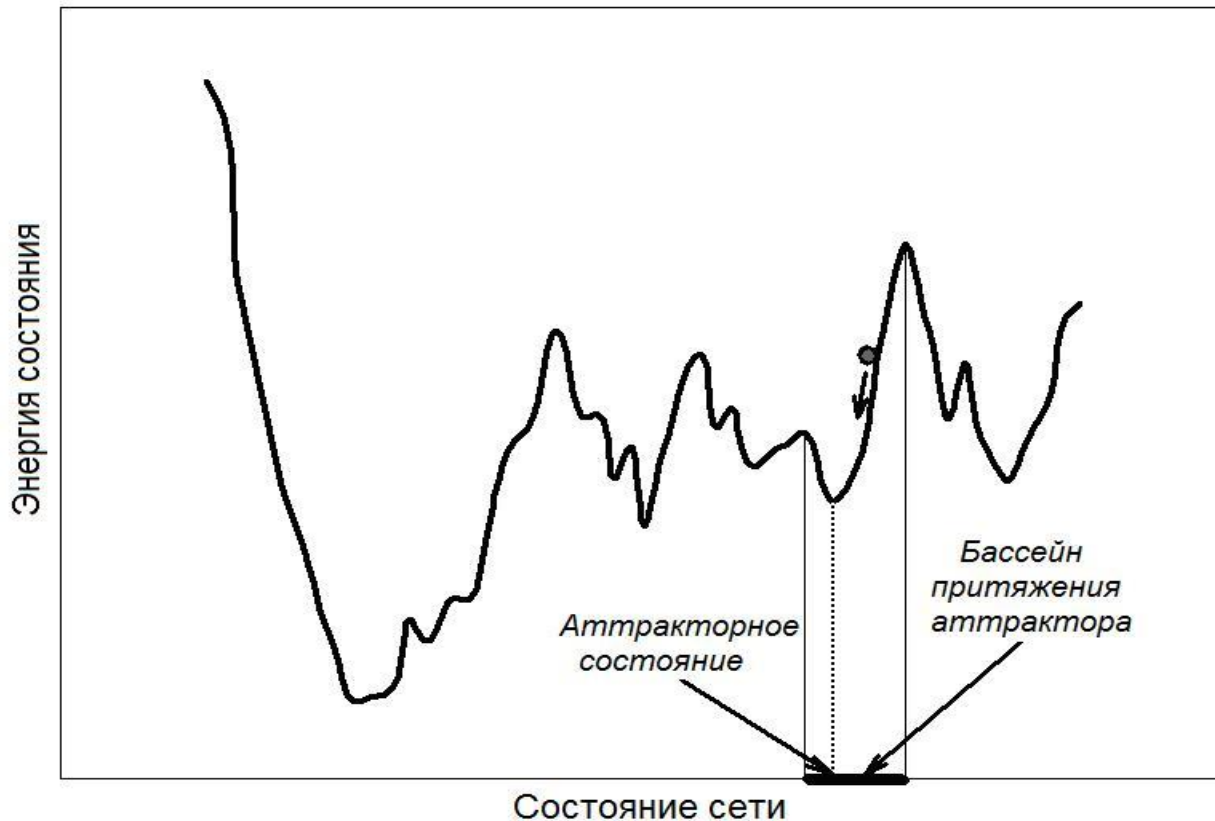
$$x_i = \frac{2}{1 + e^{-G \sum w_{ij} x_j}} - 1$$

Динамика весов  
(правило Хебба):

$$w_{ij} = w_{ij} + x_i x_j$$

# Функция Ляпунова (функция энергии)

Для рассматриваемой сети можно построить соответствующую ей функцию Ляпунова (функцию энергии, потенциальную функцию), обладающую тем свойством, что состояние сети всегда изменяется в направлении уменьшения функции энергии.



**Функция энергии для сети Хопфилда  
является суммой двух членов:**

$$E(x_1, x_2, \dots, x_n) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i w_{ij} x_j + \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n \ln[(1+x_i)^{1+x_i} (1-x_i)^{1-x_i}]$$

**При больших  $G$  преобладающее значение имеет  
первый член:**

$$E_1 = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i w_{ij} x_j$$

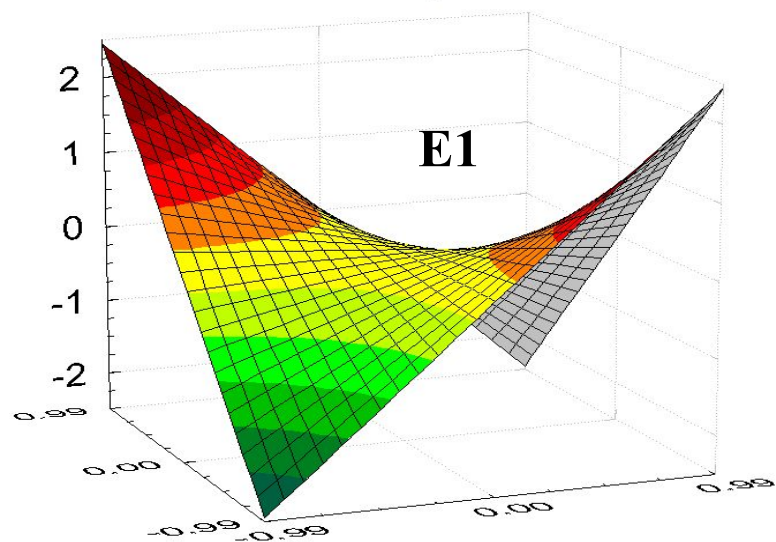
**При малых  $G$  преобладает второй член:**

$$E_2 = \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n \ln[(1+x_i)^{1+x_i} (1-x_i)^{1-x_i}]$$

# Функция энергии для сети из двух нейронов

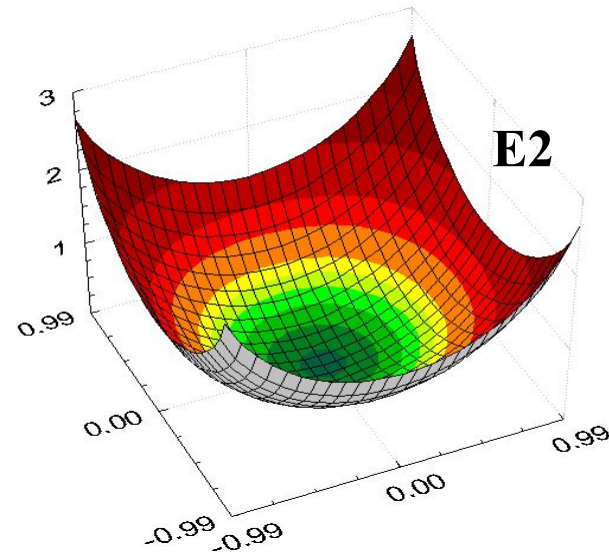
$$z = -2.5 * x * y$$

**E1**



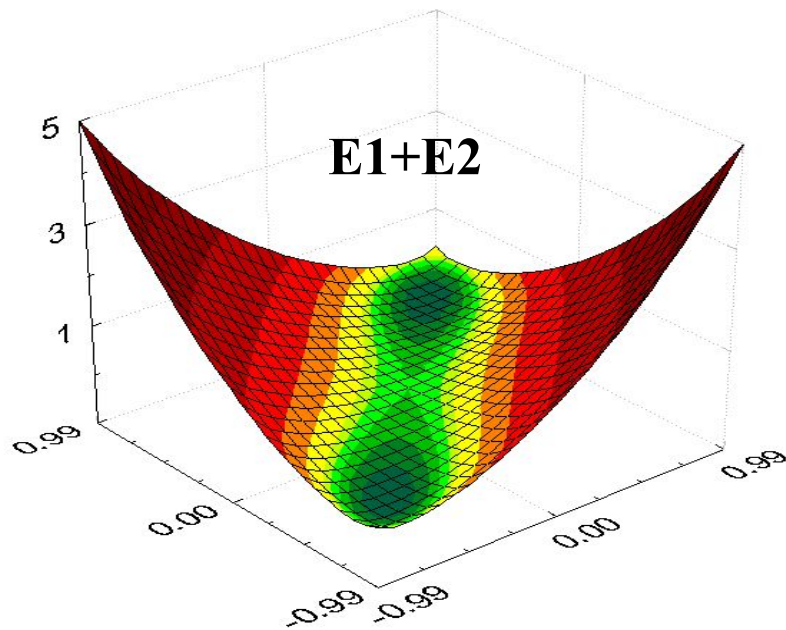
$$z = \log((1+x)^{(1+x)}) + \log((1-x)^{(1-x)}) + \log((1+y)^{(1+y)}) + \log((1-y)^{(1-y)})$$

**E2**

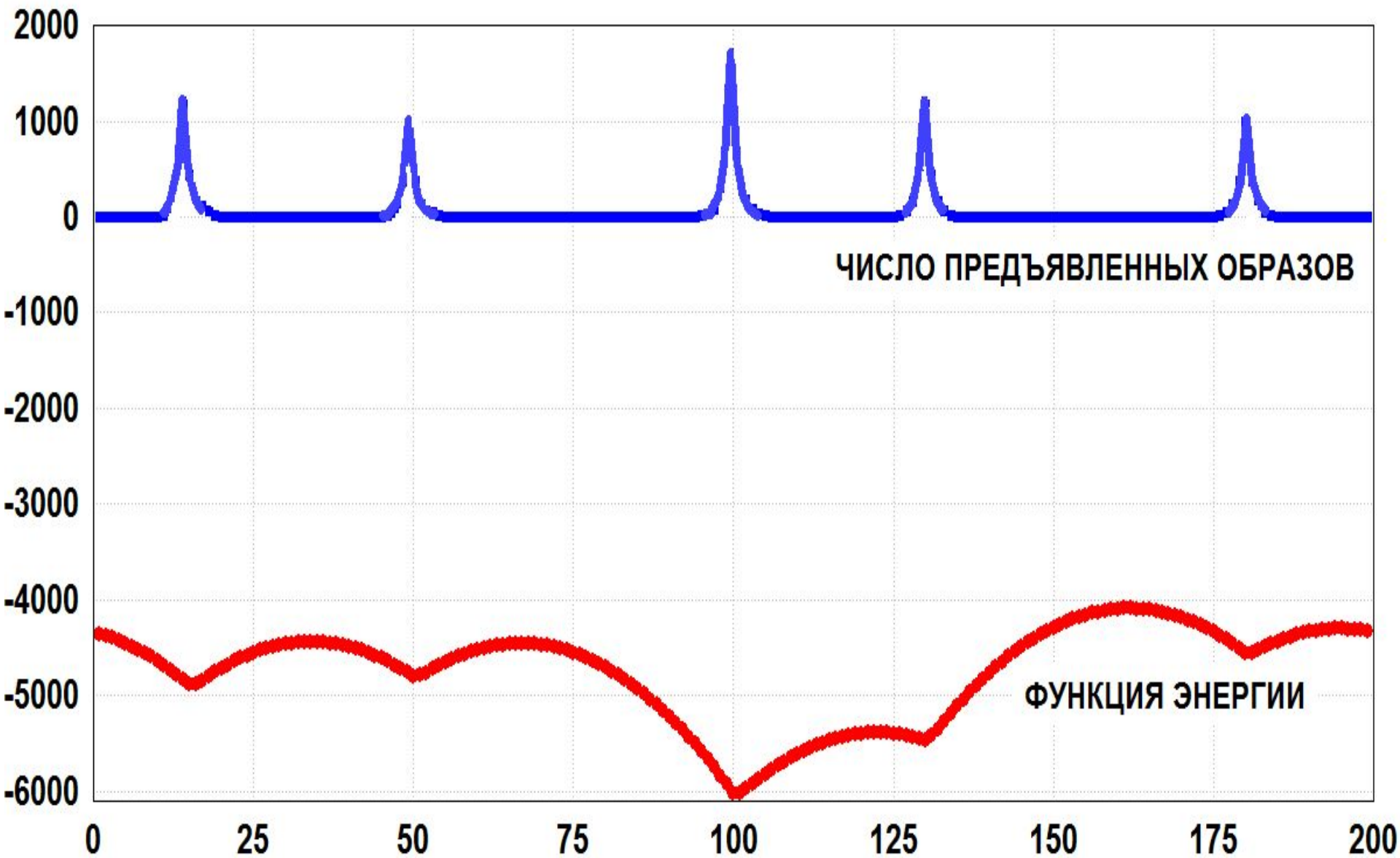


$$z = -2.5 * x * y + \log((1+x)^{(1+x)}) + \log((1-x)^{(1-x)}) + \log((1+y)^{(1+y)}) + \log((1-y)^{(1-y)})$$

**E1+E2**



# Увеличение глубины аттракторов при увеличении числа запомненных образов

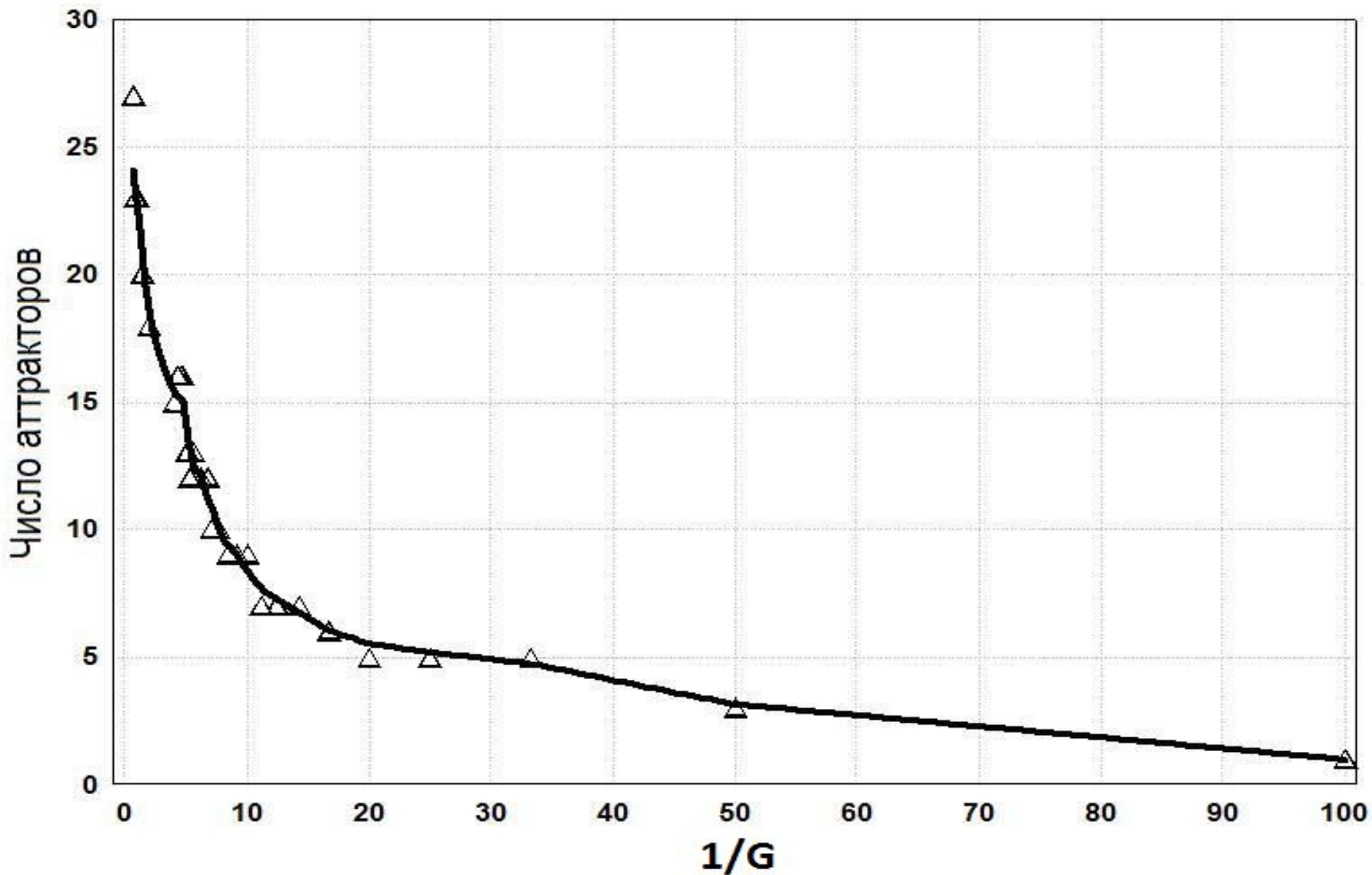


# Увеличении глубины аттрактора при увеличении параметра крутизны $G$

*При уменьшении  $G$  сначала исчезают самые мелкие аттракторы, а затем все более и более глубокие*



# Уменьшение числа аттракторов сети из 81 нейрона при уменьшении $G$ (по результатам моделирования)



# Модель старения мозга

С возрастом в мозге происходит множество нейроанатомических и нейрохимических изменений, способствующих ослаблению межнейронных связей. Например, начиная с 20-летнего возраста постоянно снижается плотность многих постсинаптических рецепторов, вследствие чего снижается чувствительность нейронов к входящим сигналам.

Соответственно, процесс старения мозга можно ассоциировать с уменьшением величины параметра крутизны  $G$  сигмоидной кривой:

$$x_i = \frac{2}{1 + e^{-G \sum w_{ij} x_j}} - 1$$

Поскольку, как было показано, уменьшение параметра  $G$  приводит к *сглаживанию рельефа функции энергии нейронной сети и уменьшению числа аттракторов*, то можно сделать вывод о том, что *при старении мозга* наряду с отрицательными, на первый взгляд, изменениями его когнитивных свойств, такими как *ослабление памяти*, у человека появляется ценная способность видеть проблемные ситуации с более общей точки зрения, выделять в них главное и, в конечном итоге, находить стратегически более эффективные решения, т.е. возникает способность, которую можно рассматривать как составляющую часть *мудрости* – когнитивного свойства, ассоциируемого традиционно с пожилым возрастом.

# Когнитивный эффект возрастного сглаживания функции энергии сети

УДК 159.92:004.032.26 ЖУРНАЛ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, 2009, том 59, № 2, с. 291–295

## КОГНИТИВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА “ТРЕТЬЕГО ВОЗРАСТА”: НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ СТАРЕНИЯ МОЗГА

© 2009 г. М. П. Карпенко, Л. М. Качалова, Е. В. Будилова, А. Т. Терехин



**«Я думаю, что сейчас я более успешно работаю в науке, чем когда был молод. В науке очень важна проницательность (judgement), а я теперь лучше понимаю, какие проблемы важны, а какие – нет.»**



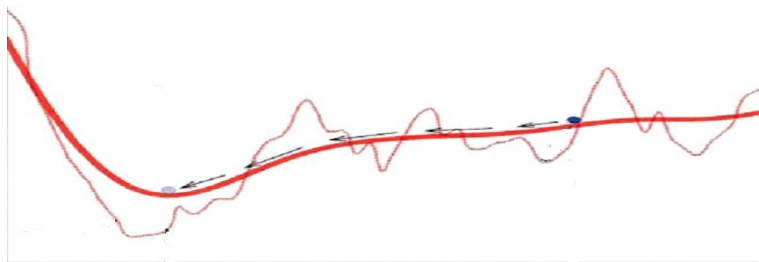
*Эрик Кандел,  
лауреат Нобелевской премии  
по медицине 2000 г.  
77 лет*

**Глобальный аттрактор нейронной сети мозга –  
какому понятию он соответствует? Может быть, это  
солженицинское «изображение вечности»?**

**«В такие минуты весь смысл существования — его  
самого за долгое прошлое и за короткое будущее, и его  
покойной жены, и его молоденькой внучки, и всех  
вообще людей представлялся ему не в их главной  
деятельности, которою они постоянно только и  
занимались, в ней полагали весь интерес и ею были  
известны людям. А в том, насколько удавалось им  
сохранить неомутненным, непродрогнувшим,  
неискаженным — *изображение вечности*, зароненное  
каждому. Как серебряный месяц в спокойном пруду.»**

**А.И. Солженицын. Раковый корпус.  
Глава 30 - Старый доктор.**

**М., <sup>14</sup>Новый мир, 1991.**



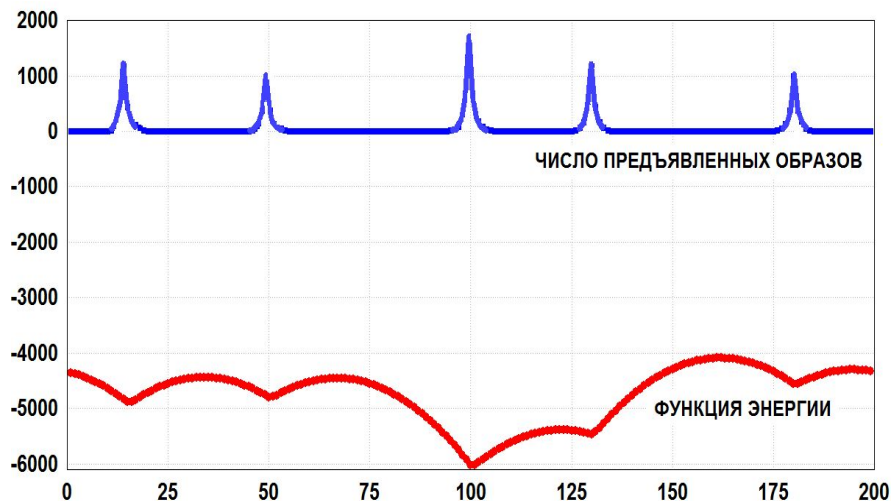
# Развитие мозга

В период младенчества и раннего детства, наоборот, усложняется рельеф функции и увеличивается число ее аттракторов, поскольку растет число межнейронных связей и их интенсивность увеличивается. Однако в последующие годы детства, отрочества и юности значительная часть межнейронных связей (до 40%) элиминируется. Казалось бы, рельеф функции энергии должен сглаживаться. Однако наши расчеты показывают, что при не слишком больших масштабах элиминации наиболее слабых межнейронных связей локальные минимумы функции энергии, наоборот, углубляются – происходит как бы контрастирование сформировавшихся образов (понятий). 15



# Процент элиминированных межнейронных связей и значения функции энергии сети из 200 нейронов в локальном минимуме $k = 100$ при $G = 72 \times 10^{-5}$ .

Процент элиминированных связей	0%	10%	20%	30%	40%
Значение функции энергии	$-538 \times 10^5$	$-594 \times 10^5$	$-650 \times 10^5$	$-342 \times 10^5$	$-605 \times 10^5$





Таким образом, в период младенчества, детства, отрочества и юности рельеф функции Ляпунова нейронной сети мозга усложняется, а ее локальные минимумы углубляются. Развитие мозга в направлении от простого к сложному имеет принципиальное значение. *Сложный неструктурированный мозг не способен эффективно усвоить захлестывающий его поток слабо структурированной внешней информации.* Он должен быть сначала простым, чтобы уловить наиболее общие внешние закономерности, и только после этого постепенно усложняясь, усвоить детали. На уровне компьютерного моделирования эта «важность начинания с малого» была показана Дж. Элманом на примере спонтанного усвоения правил грамматики искусственной нейронной сетью [Elman 1993].

# Телескопический эффект автобиографической памяти

М.П. Карпенко, Е.В. Чмыхова, А.Т. Терехин  
МОДЕЛЬ ВОЗРАСТНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ВОСПРИЯТИЯ  
ВРЕМЕНИ. Вопросы психологии, 2009

**Таким образом, в молодости рельеф функции энергии нейронной сети усложняется, а в пожилом возрасте сглаживается, как бы приближаясь к его детскому состоянию. Кроме того, с возрастом растет доля воспоминаний о далеком прошлом. Учитывая также, что все регуляторные системы организма образуют единую нейрогеногуморальную сеть, следует сделать вывод о том, что в пожилом возрасте должен наблюдаться не только ментальный, но и эмоциональный возврат к прошлому, т.е. происходить как бы обратное движение во времени. Можно сказать, что, в некотором смысле, жизнь это долгое возвращение в детство – к тому «изображению вечности», которое было «заронено» в нас при рождении.**