

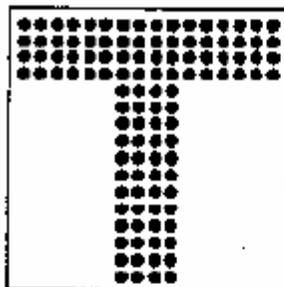
# Интеллектуальные системы и технологии

Лекция 11.

Модель Хопфилда

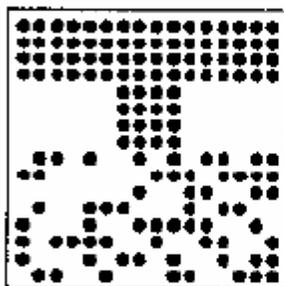
# Задачи, решаемые ассоциативной памятью:

1) Восстановление зашумленных образов 2) ассоциативное вспоминание



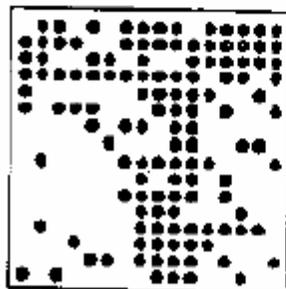
Original 'T'

Входной образ



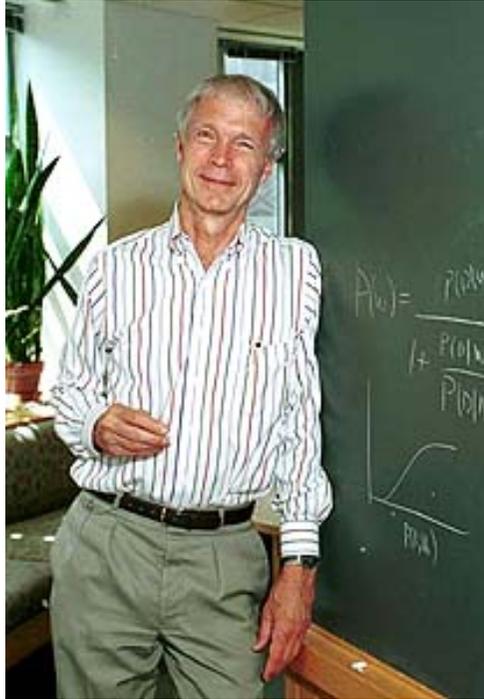
half of image corrupted by noise

Образ – результат ассоциации



20% corrupted by noise (whole image)

# Модель Хопфилда



Вид рекуррентных сетей

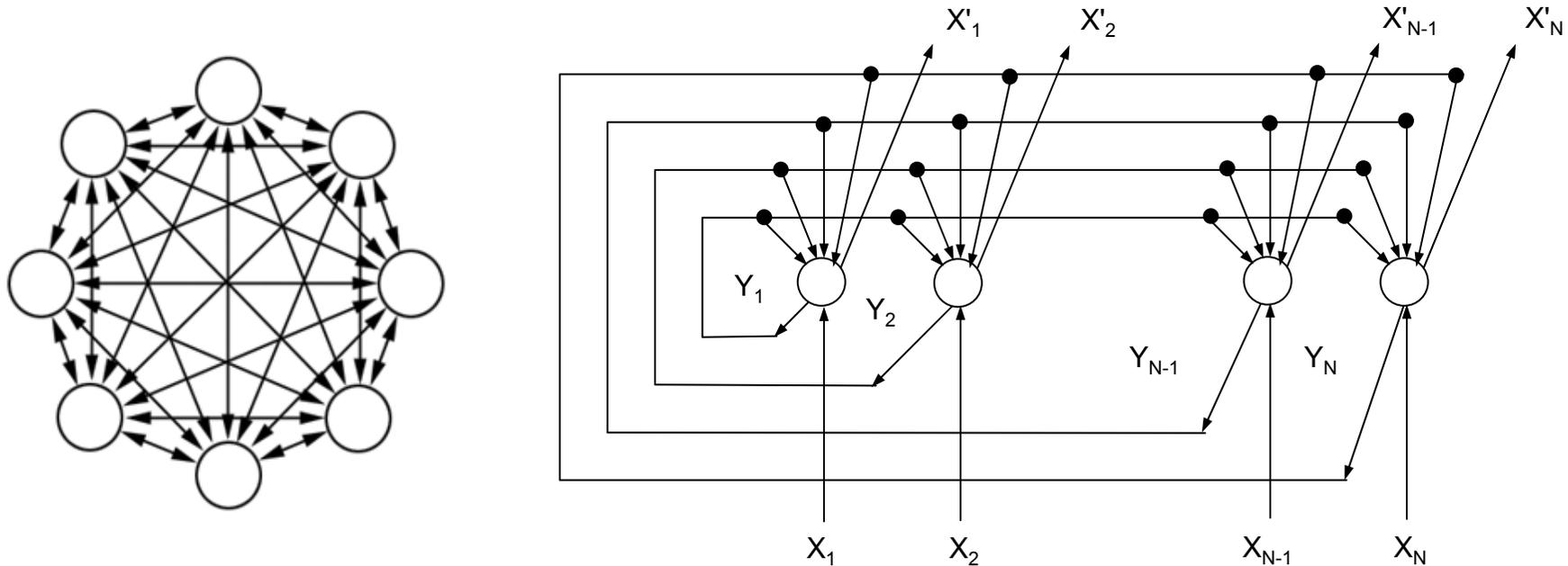
- Полностью рекуррентные связи
- Веса связей симметричны

Обучение по правилу Хебба

→ **автоассоциативная память или память, адресуемая по содержанию**



# Hopfield Model (2)



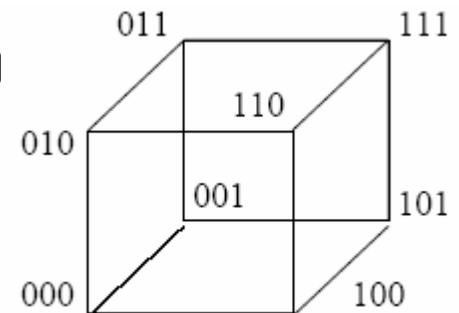
Особенности структуры:

- Каждый нейрон связан со всеми остальными
- Связи симметричны, т.е. для всех  $i$  и  $j$   $w_{ij} = w_{ji}$
- Любой нейрон может быть входным или выходным
- Предъявление входных данных – установка состояний входных нейронов

# Нейроны в сети Хопфилда

- Нейроны бинарные
  - Могут быть активными (1) или пассивными (0)
  - Или + или –
  - Может быть одни из следующих вариантов представления: (-1,1) или (0,1)
- Сеть содержит  $N$  нейронов
- Состояние сети описывается вектором состояний из 0 и 1 (или из -1 и 1):

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_N) = (0, 1, 0, 1, \dots, 0, 0, 1)$$



# Функционирование сети Хопфилда:

- Вычисляются состояния нейронов сети пока сеть не придет в устойчивое состояние
  - Для каждого нейрона вычисляется взвешенная сумма входов:

$$h_j = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N u_i \cdot w_{j,i}$$

- Если эта сумма положительна, то состояние нейрона устанавливается в 1, в противном случае -1:

$$u_j = \begin{cases} 1 & \text{if } h_j \geq 0 \\ -1 & \text{if } h_j < 0 \end{cases}$$

# Функционирование сети Хопфилда (2):

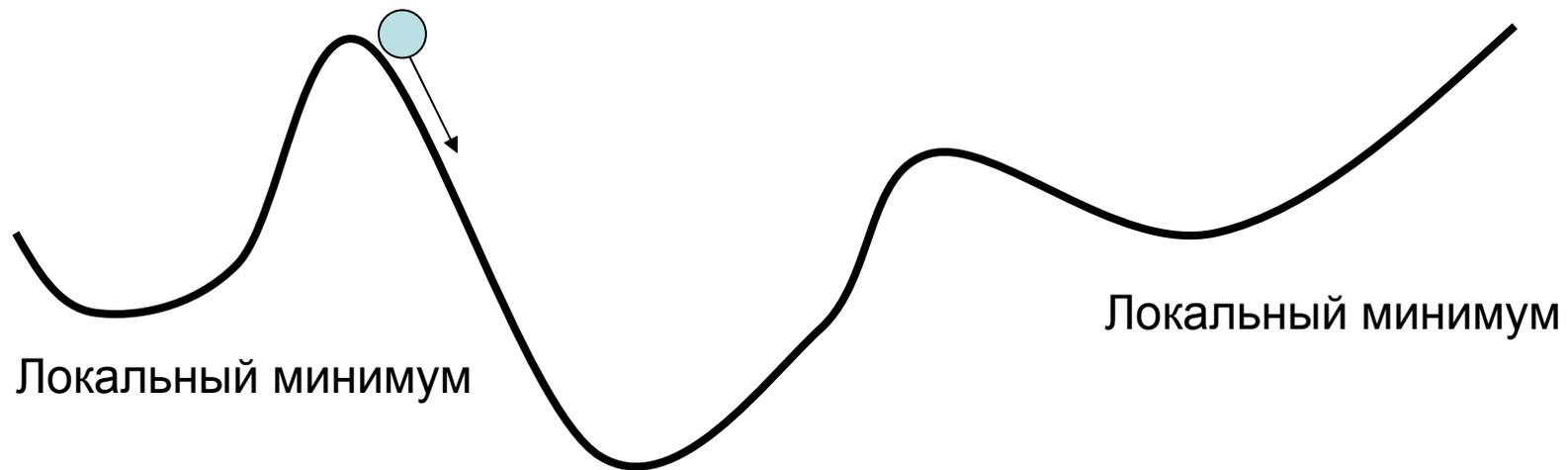
- Состояние сети ассоциируется с так называемой энергетической функцией:

$$E = -\frac{1}{2} \sum_j \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N w_{j,i} u_i u_j$$

- Система стремится к устойчивому состоянию с минимальным значением энергии

# Энергетическая функция:

- Можно представить как многомерную поверхность



Глобальный минимум

Гаврилов А.В.

НГТУ, кафедра ВТ

# Ассоциативная память, основанная на сети Хопфилда

- Два процесса:
  - Обучение
  - Использование обученной сети (вызов, recalling)

# Обучение

- Каждый образ представляется вектором из -1 и 1:

$$S_p = (-1, 1, -1, 1, \dots, -1, -1, 1) = (s_1^p, s_2^p, s_3^p, \dots, s_N^p)$$

- Если количество образов равно  $m$ , то:

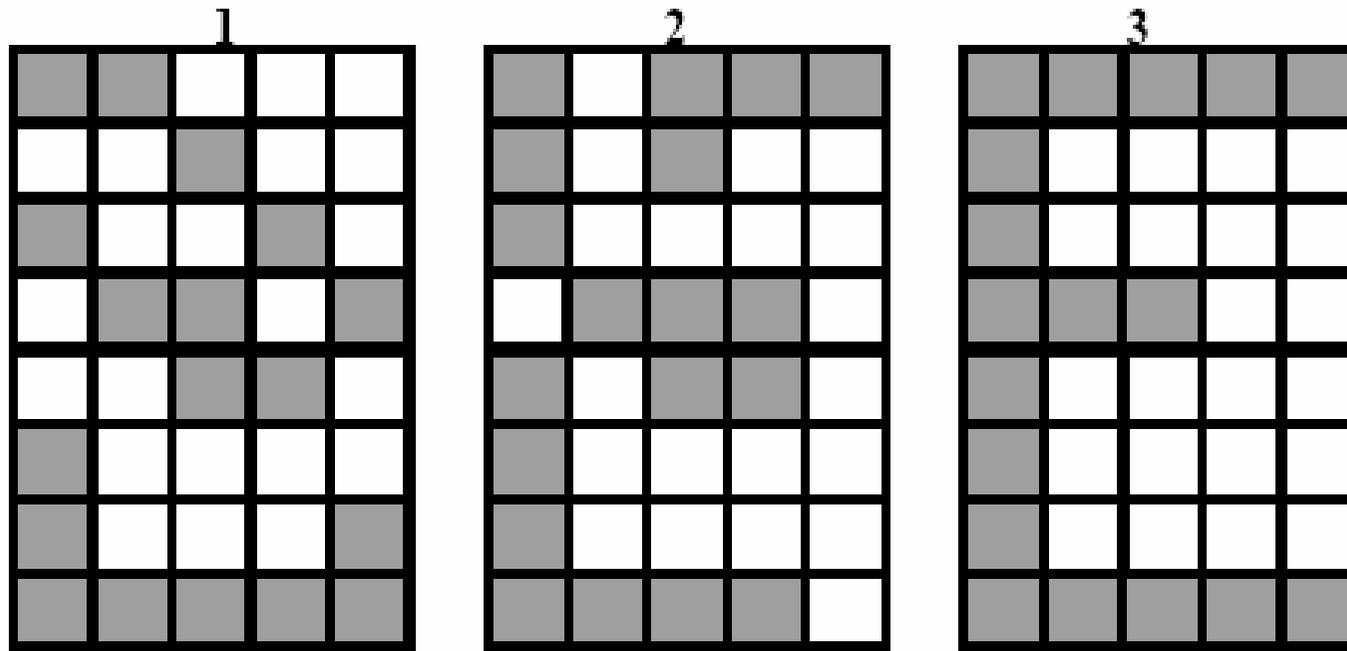
$$w_{i,j} = \sum_{p=1}^m s_i^p s_j^p$$

- Веса могут быть вычислены без предъявления образов
- Правило Хебба:
  - Для модели Хопфилда: Веса связей увеличиваются между нейронами с одинаковыми состояниями и уменьшаются в противном случае

# Использование обученной сети

- Итерационный процесс вычисления состояний нейронов пока не будет достигнуто устойчивое состояние
- Входные нейроны могут быть заморожены (не меняются их состояния), если считается, что нет «шума»
- Для получения правильного образа (одного из сформированных в памяти в процессе обучения) необходимо предъявить достаточно длинный входной вектор, и сеть должна обладать достаточной информационной емкостью

# Пример восстановления зашумленного образа



# Example of preparing of data for learning working (task – estimation of prize of flat). Length of vector (N) - 29

District:	
Name 1	000
Name 2	001
Name 3	010
Name 4	011
Name 5	100
Name 6	101
Type of flat	
no	00
Panel	01
Large size	10
Monolith	11
Floor	
1	0000
2	0001
3	0010
4	0011
5	0100
6	0101
7	0111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110

Number of storeys:	
1	0000
2	0001
3	0010
4	0011
5	0100
6	0101
7	0111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
Material:	
panels	00
bricks	01
concrete	10
Square all	
20-30	00
31-40	01
41-50	10
51-63	11
Square of rooms	
10-15	000
16-20	001
21-25	010
26-30	011
31-35	100
36-40	101

Square of kitchen	
4-6	00
7-8	01
9-10	10
11-12	11
Balcony	
no	00
balcony	01
loggia	10
Balcony + loggia	11
Phone	
yes	0
no	1
Prize	
71-90	0000
91-110	0001
111-130	0010
131-150	0011
151-170	0100
171-190	0101
191-210	0110
211-230	0111
231-250	1000
251-270	1001
271-290	1010
291-310	1011
311-330	1100
331-350	1101
351-370	1110
371-390	1111

Гаврилов А.В.  
НГТУ, кафедра ВТ

# Ограничения сети Хопфилда

- Могут вызываться не наиболее близкие образы из-за локальных минимумов энергетической функции
- Некоторые образы могут вызываться чаще, чем другие
- Могут вызываться мнимые образы из-за симметричности связей
- Информационная емкость:  $\leq 0.15 N$

- Для борьбы с локальными минимума энергетической функции используется внедрение в модель Хопфилда случайного процесса изменения весов (машина Больцмана)
- Есть вариант сети Хопфилда для аналоговых входов-выходов
- Развитие бинарной сети Хопфилда – двунаправленная ассоциативная память (ДАМ) или bidirectional associative memory (ВАМ)
  - Состоит из двух моделей Хопфилда, связанных между собой
  - Позволяет использовать ассоциации между двумя образами