Центр нейронаук и когнитивных наук МГУ

Теория сложных сетей как мост между физикой и нейронаукой

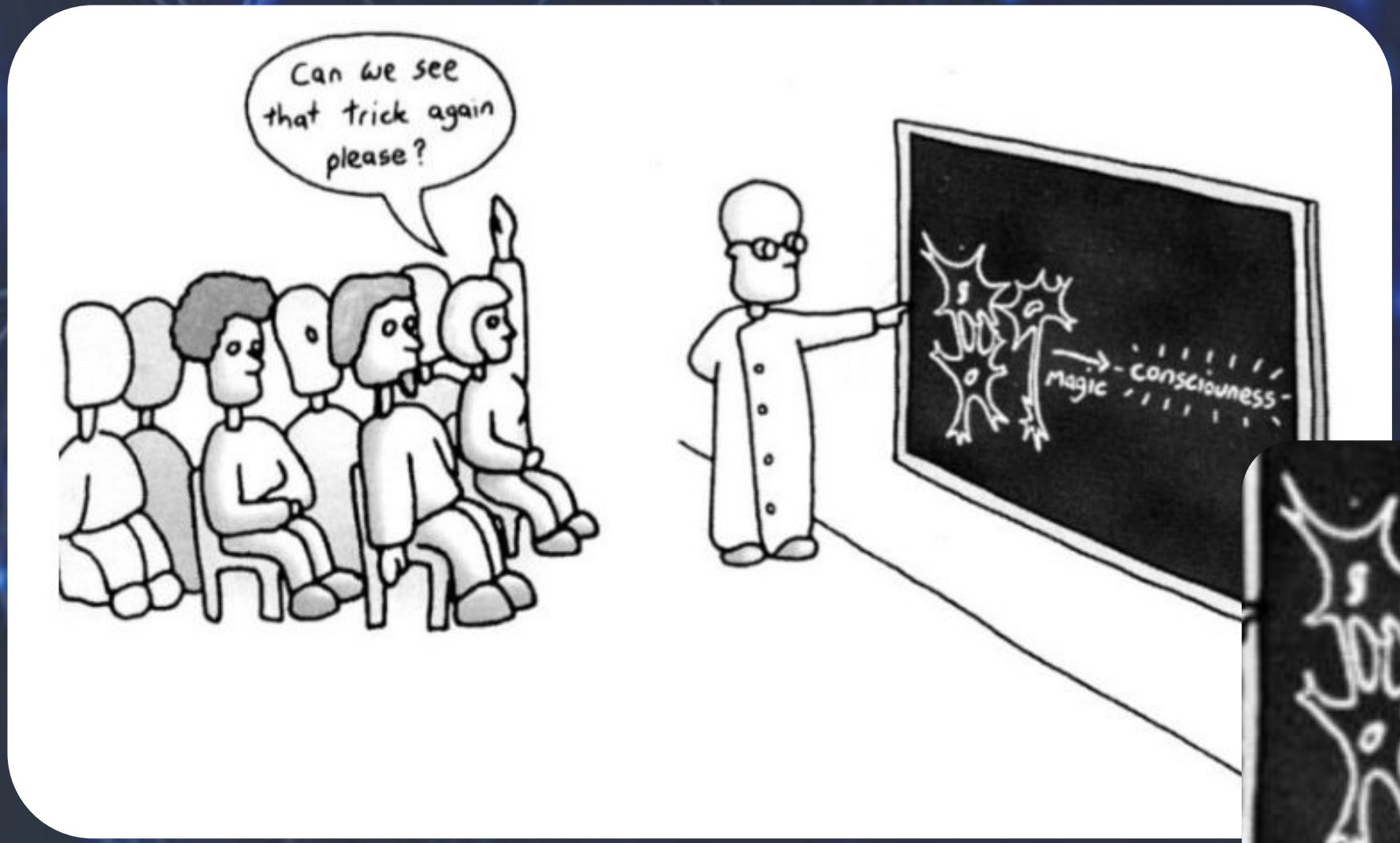
Поспелов Никита Андреевич

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

Санаторий РАН «Звенигородский»

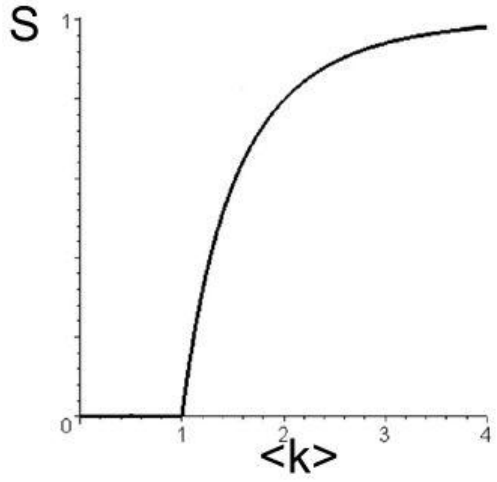
21.10.2018

Нейробиология и теория сознания

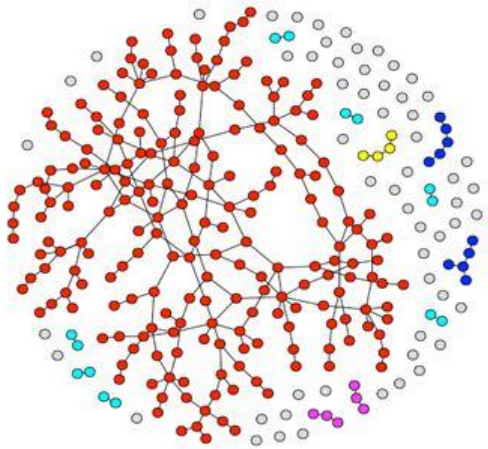


0. Фазовый переход в графе Эрдеша - Реньи

Connectivity ("Percolation") of Random Graphs



S: the fraction of nodes in the giant component, $S=N_{GC}/N$

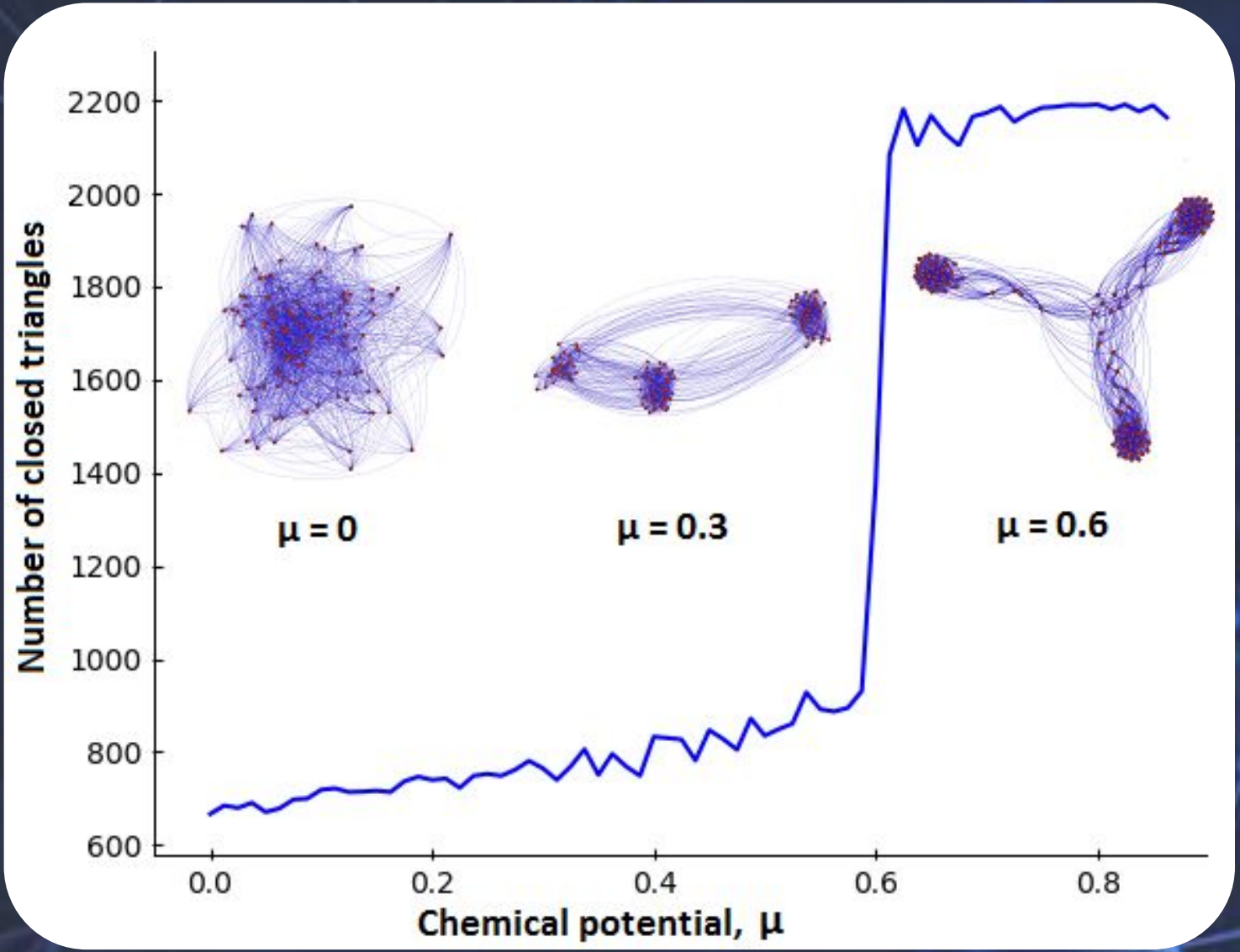


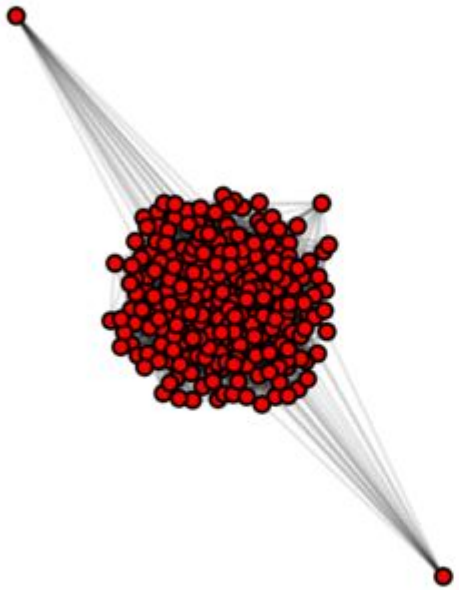
there is a phase transition at <k>=1:

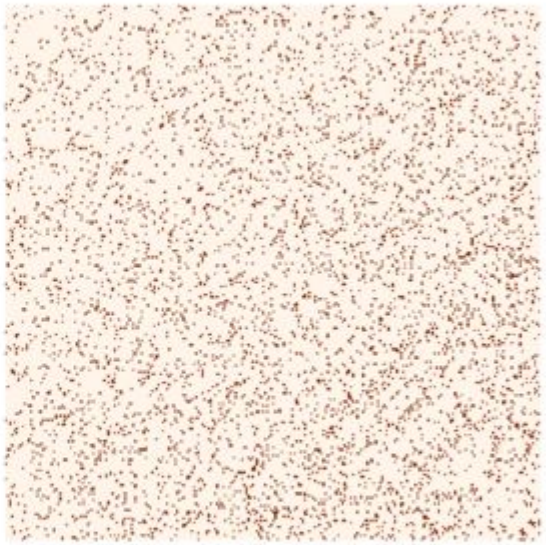
- for <*k*> < 1 there is no giant component
- for <*k*> > 1 there is a giant component
- for large <k> the giant component contains all nodes (S=1)

http://linbaba.files.wordpress.com/2010/10/erdos-renyi.png

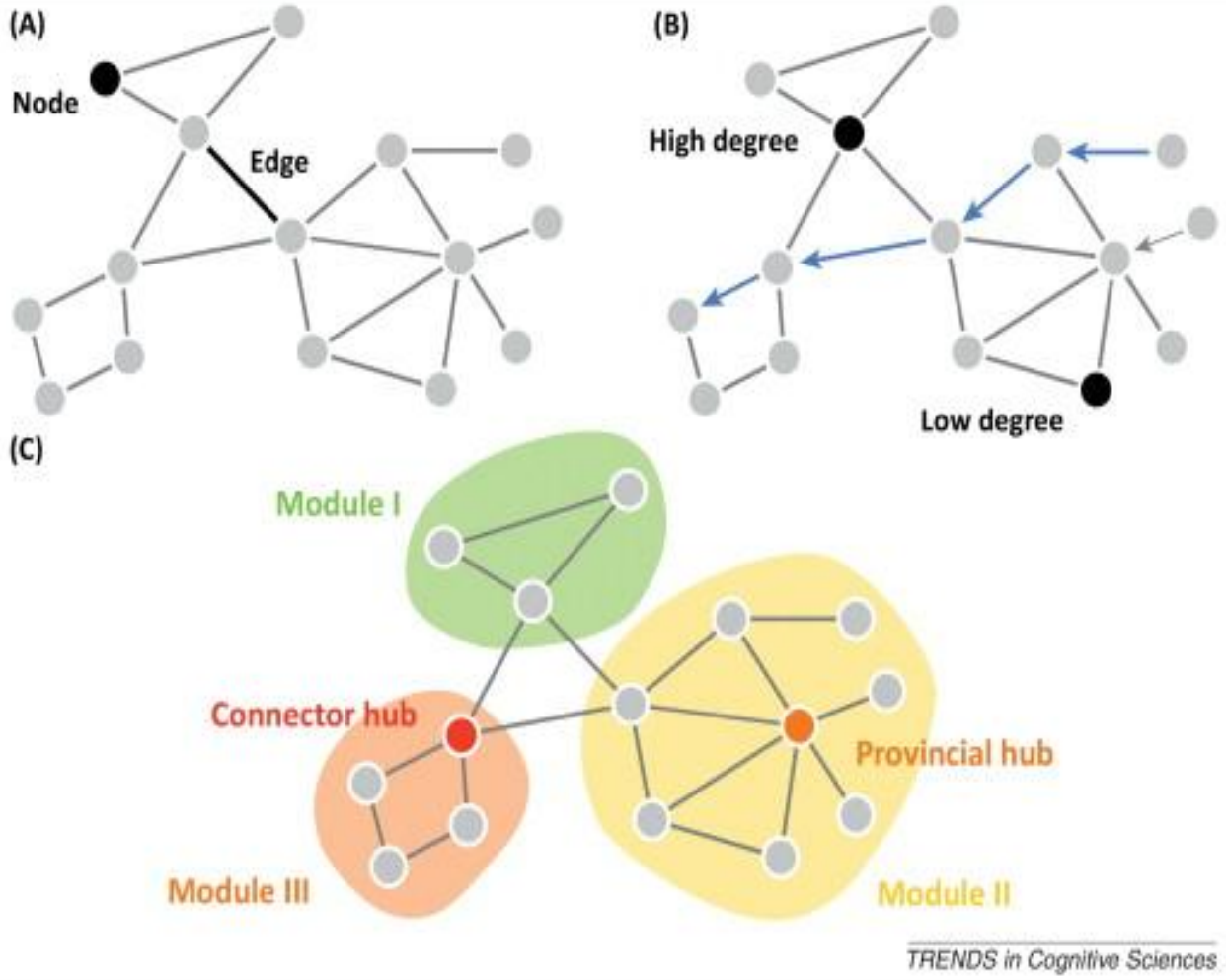
1. Эволюция случайной сети в сторону увеличения кластеризации



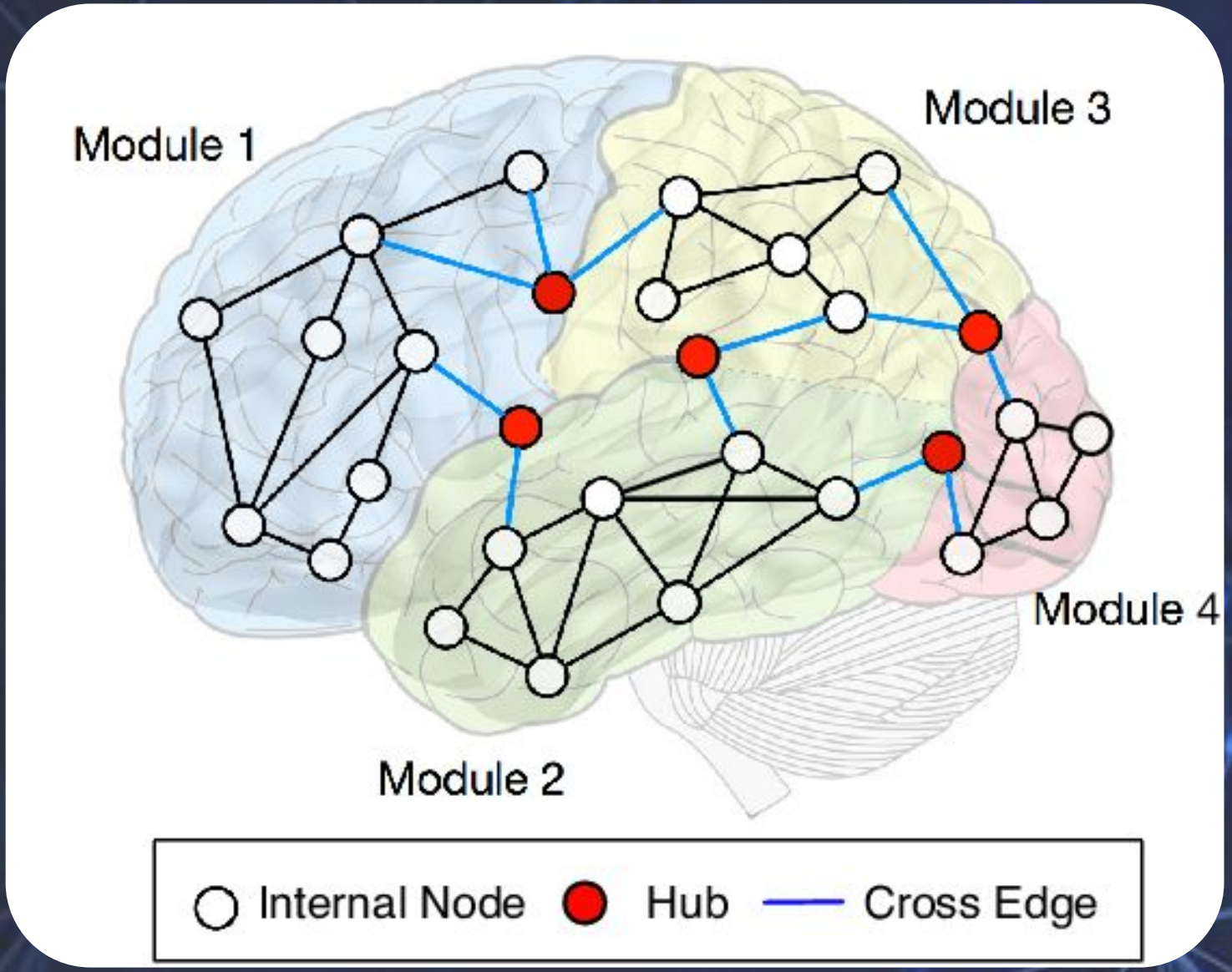




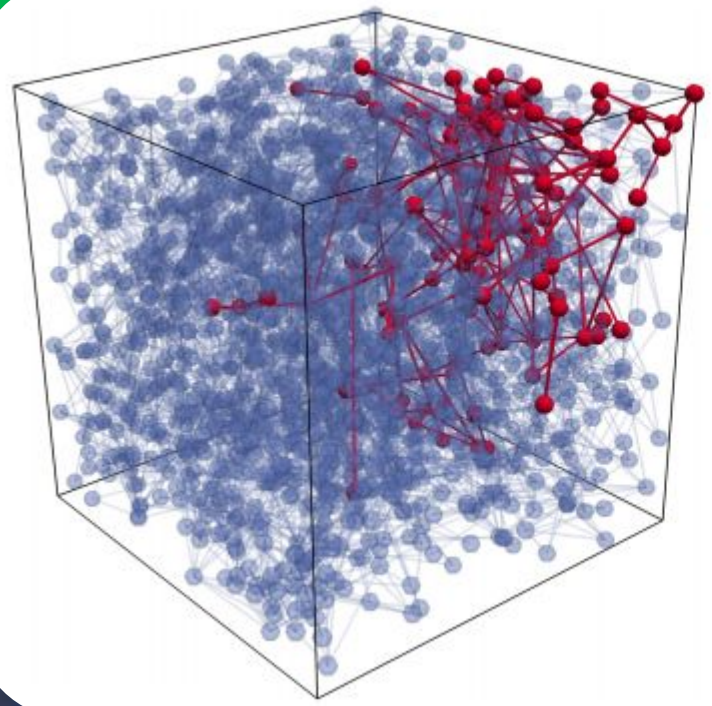
Структура кластеризованной сети мозга

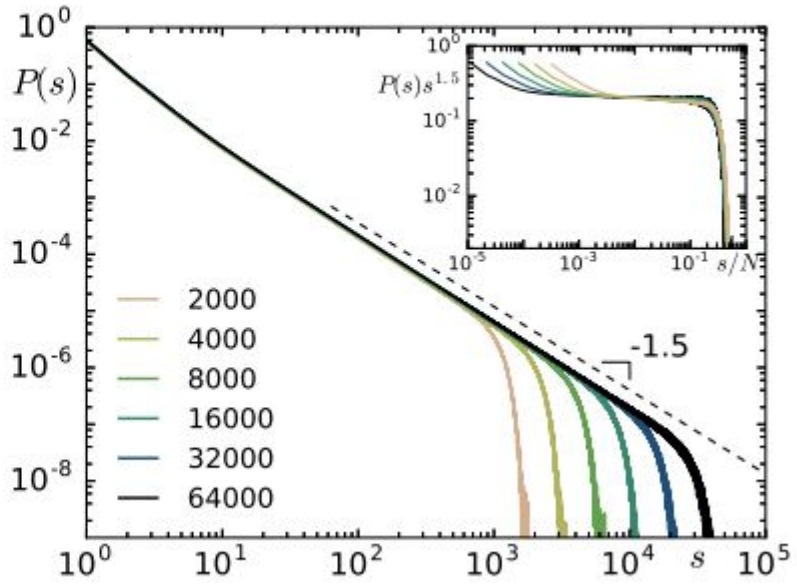


Структура кластеризованной сети мозга

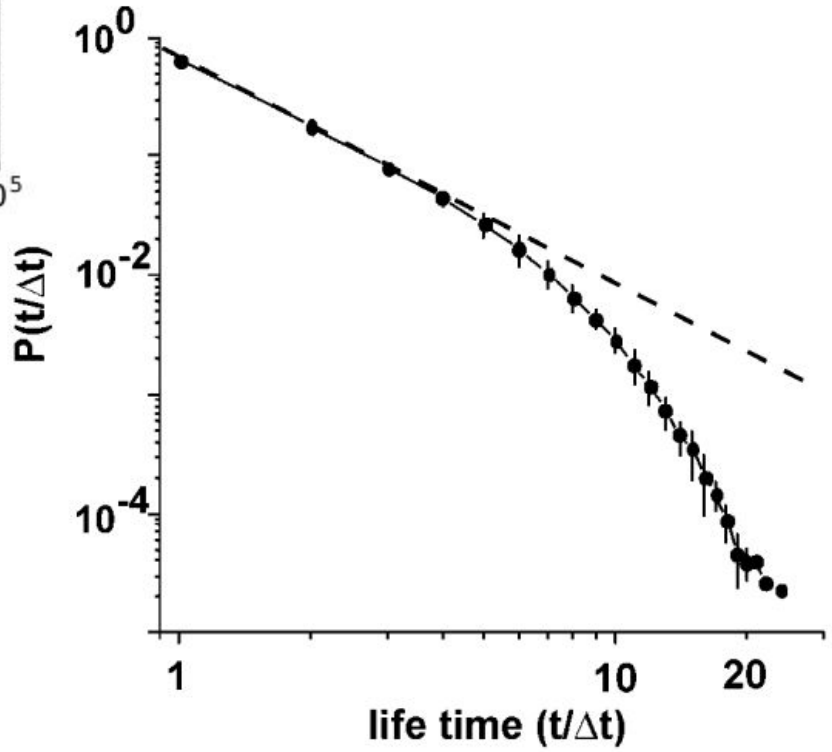


2. Распределение лавин в модельной и реальной сети



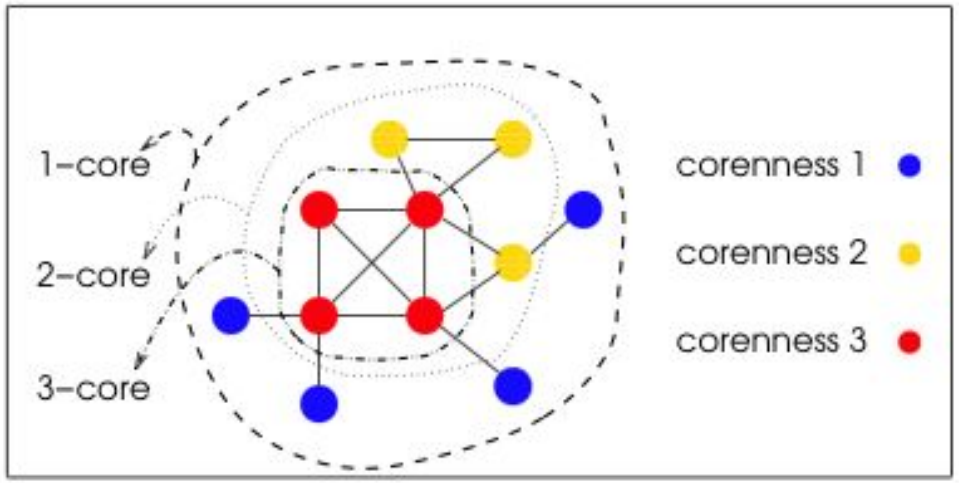


Avalanches in Barabashi-Albert networks

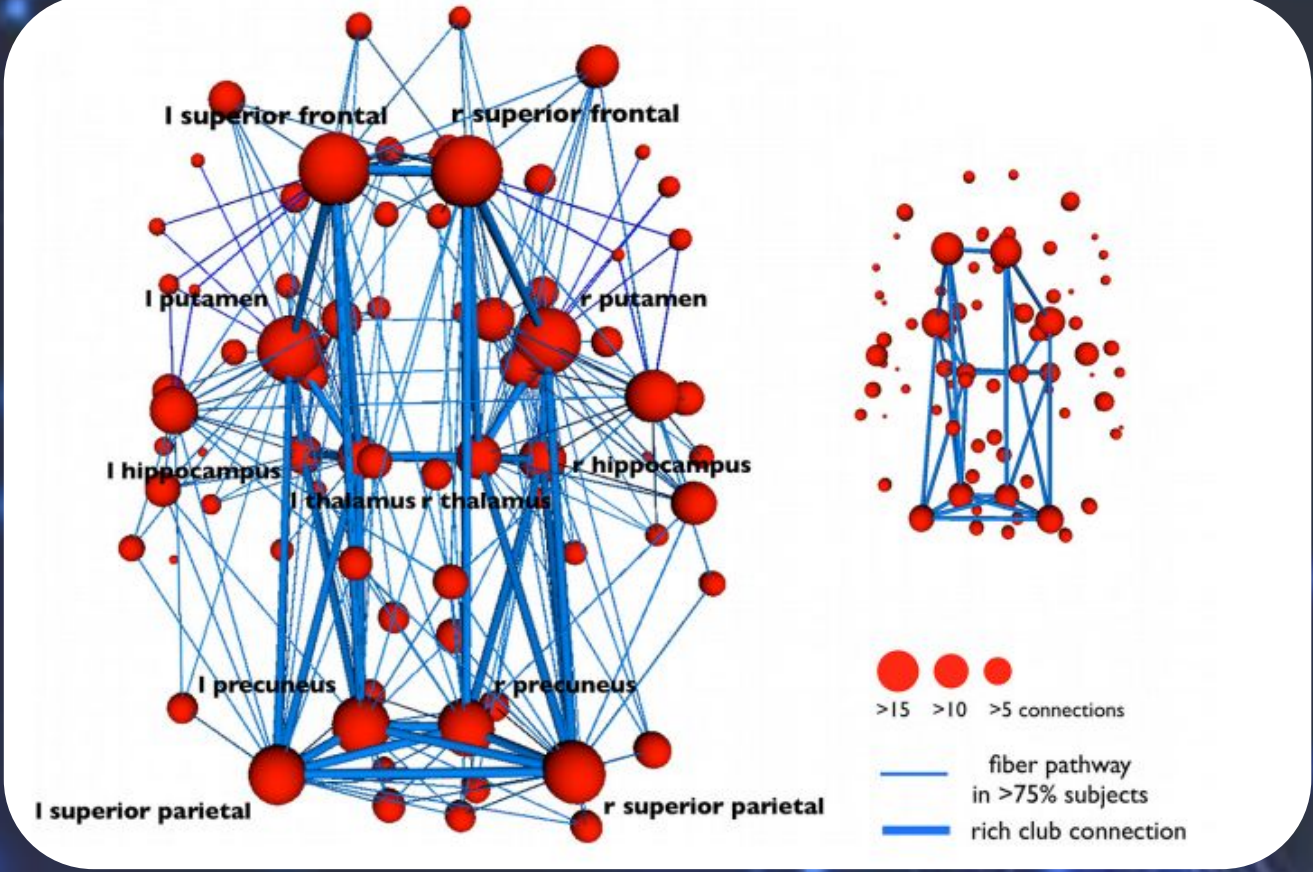


Avalanches in neuronal cultures

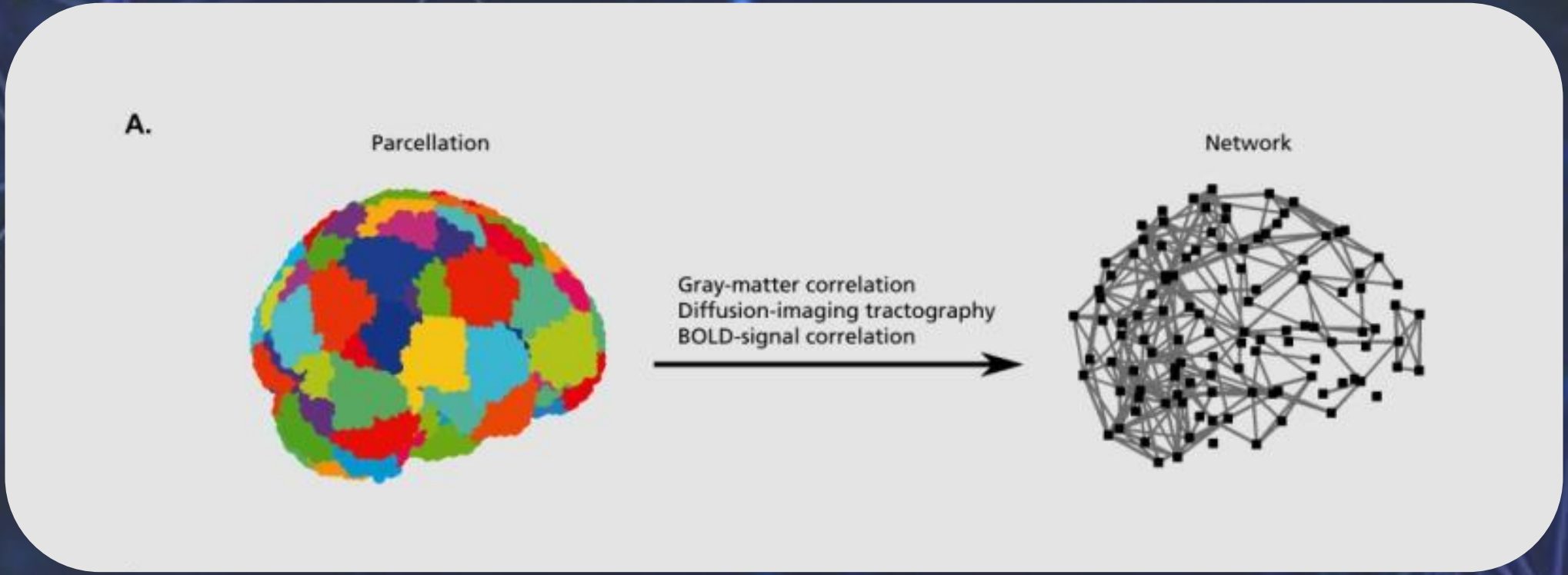
3. «Клуб избранных» в сетях



K-core



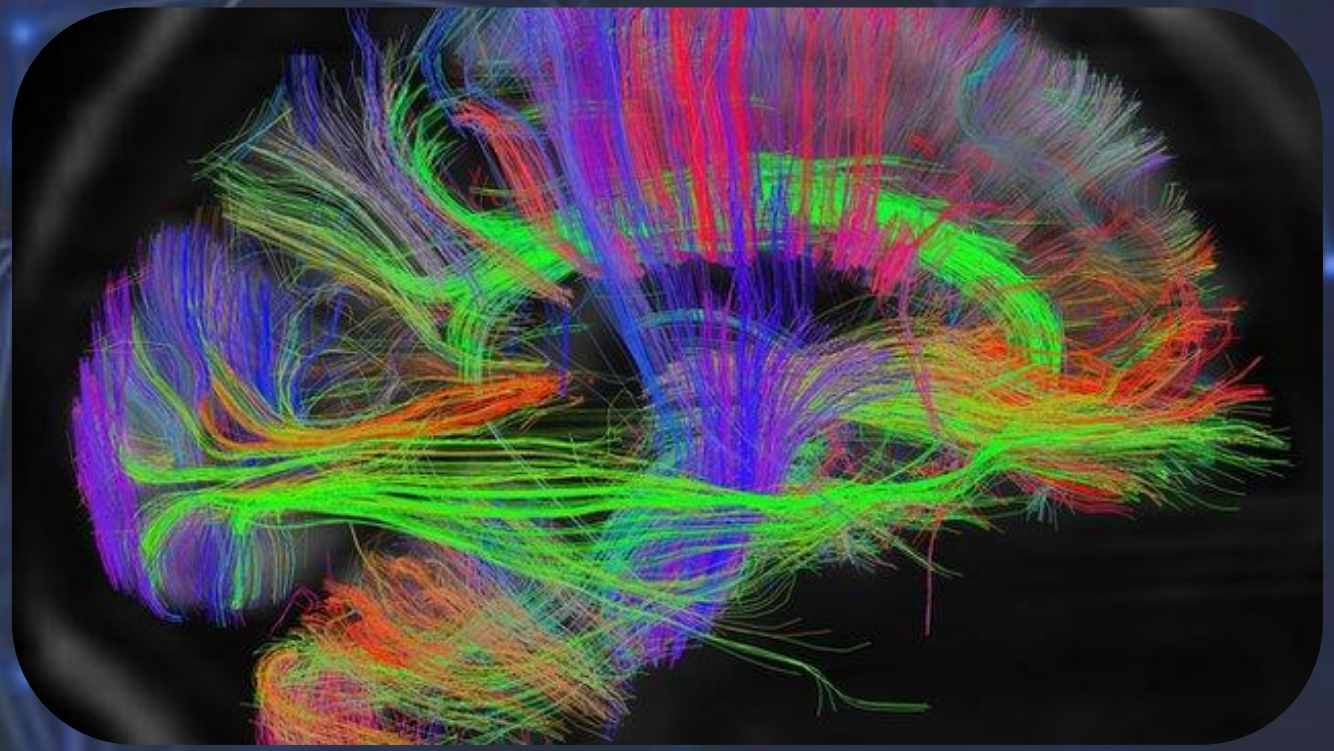
Rich club



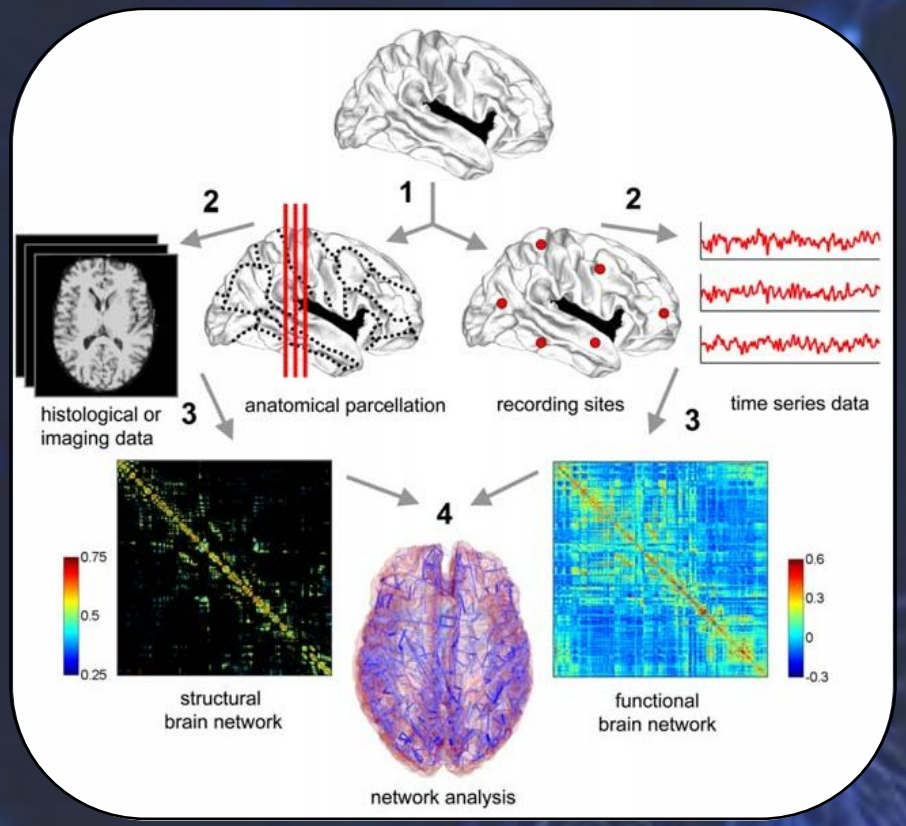
Структурные (анатомические) сети – массив структурных связей между нейронами, их группами или большими областями мозга

Функциональные сети – массив статистических корреляций между областями, на которые разбивается мозг или его часть

Сетевой анализ мозга



Визуализация коннектома

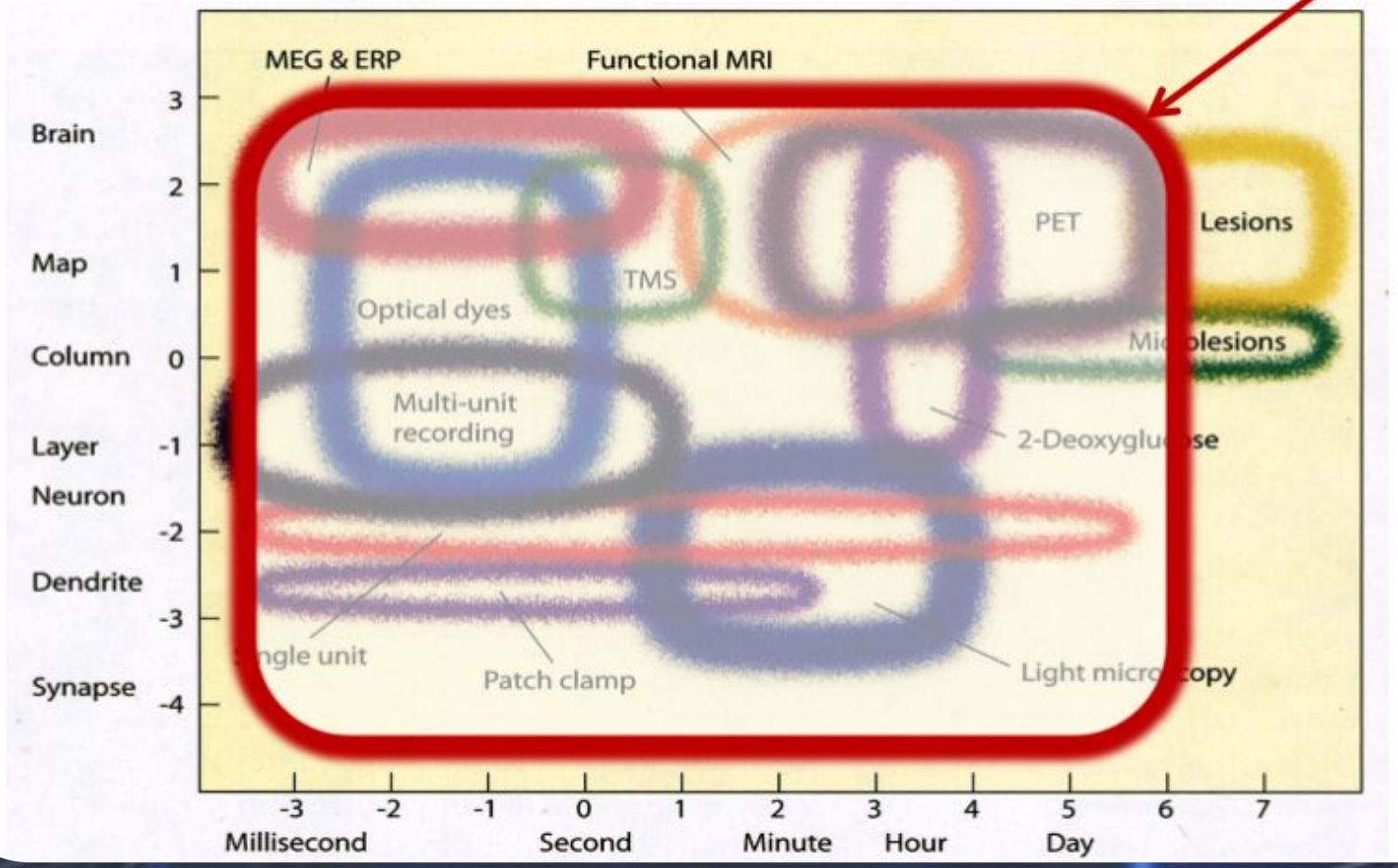


Получение сетей разного типа

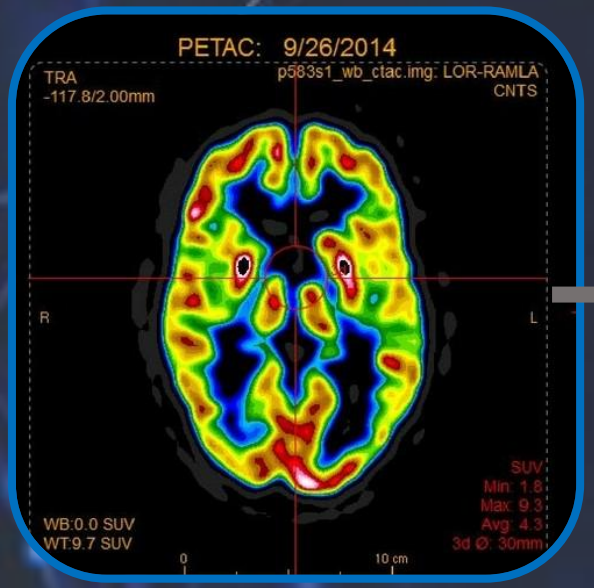
Современное состояние методов регистрации

Разрешение - индивидуальные нейроны
Масштаб - весь мозг
Динамика - в ходе поведения и когнитивной активности

недостающая технология

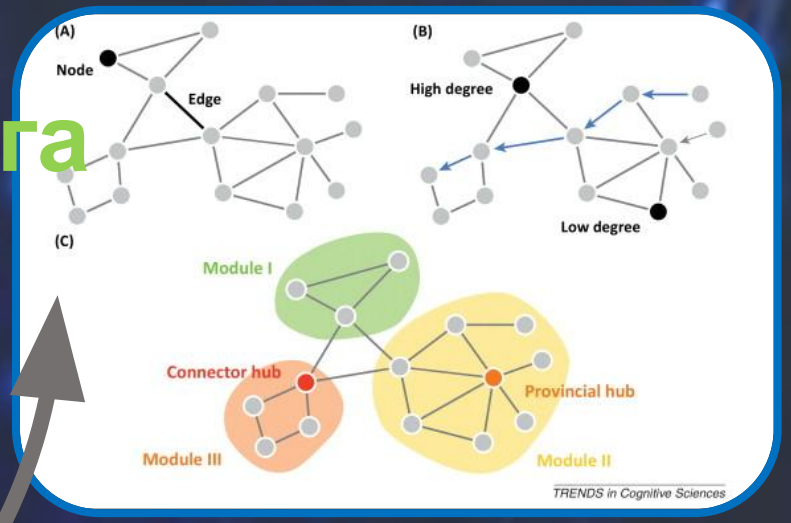


Математический анализ сетей мозга

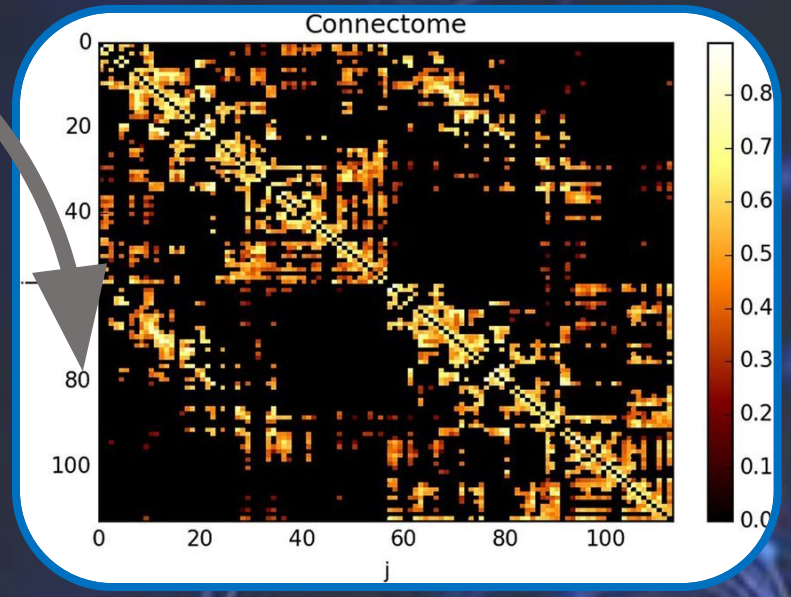


Набор изображений или анатомических данных

Построение структурной или функциональной сети мозга (коннектома)

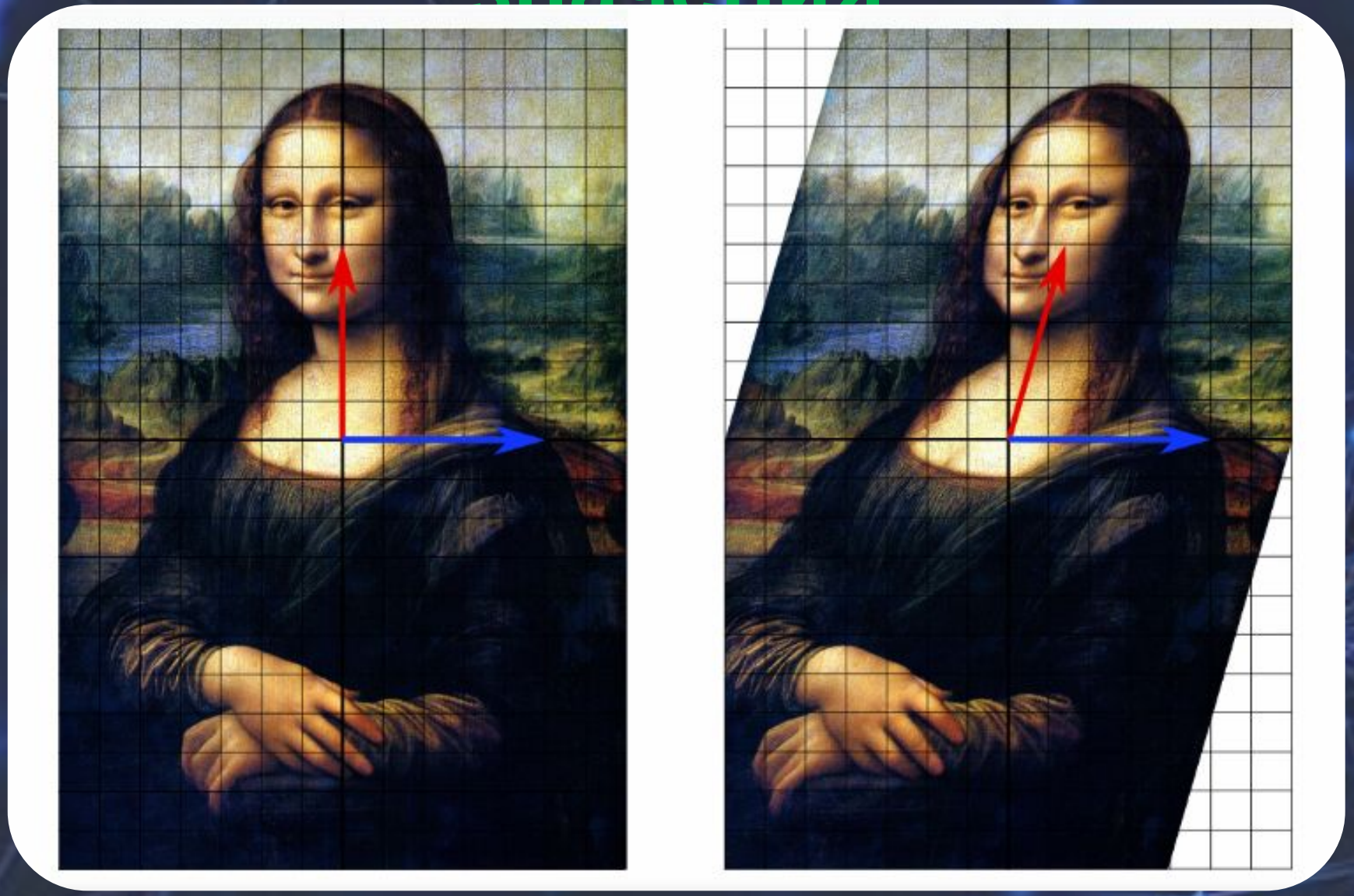


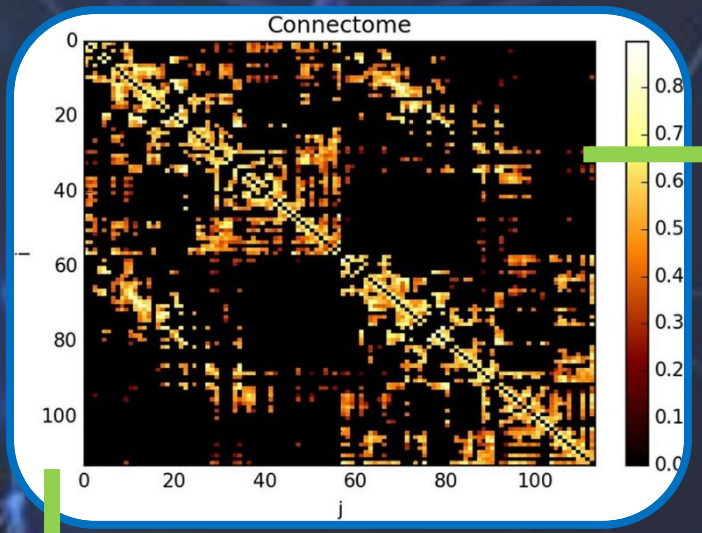
Теория сложных сетей (локальные свойства)

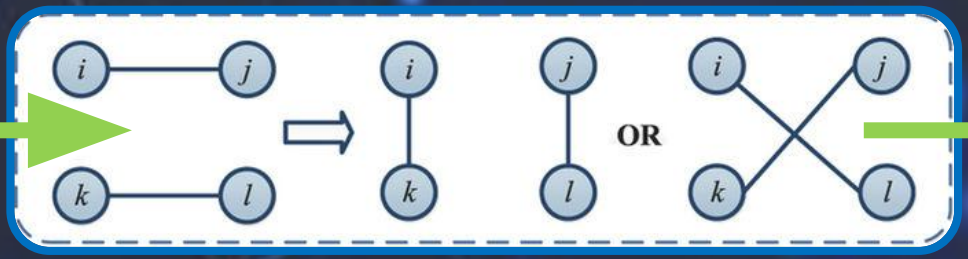


Спектральная теория графов (глобальные свойства)

Собственные вектора & собственные значения







Алгоритмы рандомизации

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Матрица A исходной сети

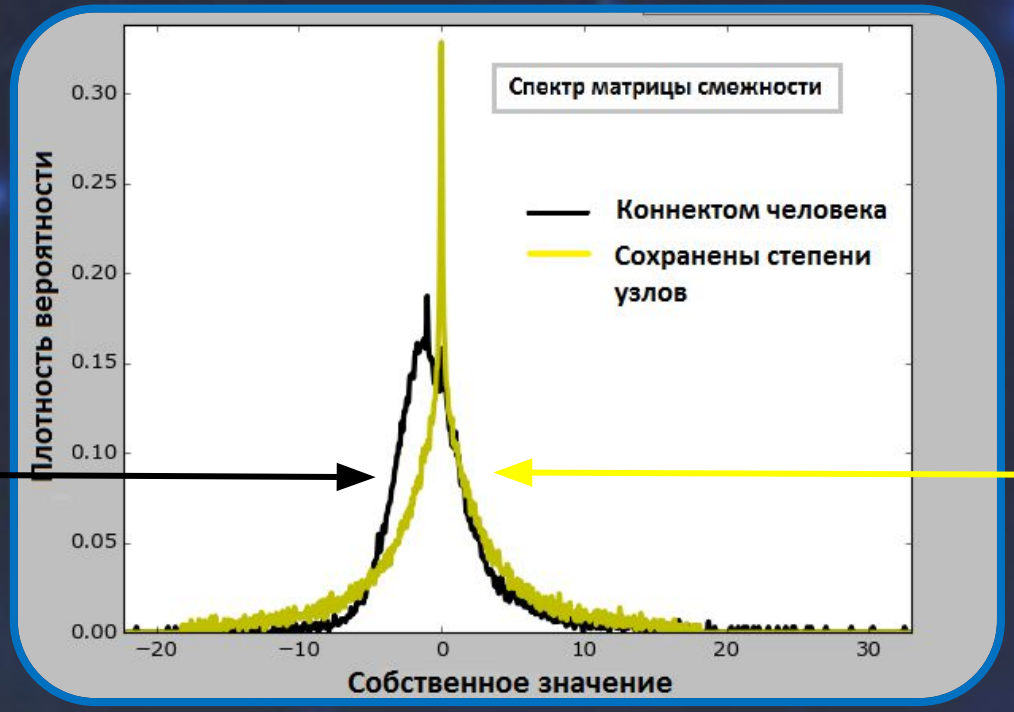
Матрица A′ рандомизированной сети

$$\det(A - \lambda I) = 0$$

$$\det(A' - \lambda I) = 0$$

Собственные значения

Собственные значения



Спектр сети

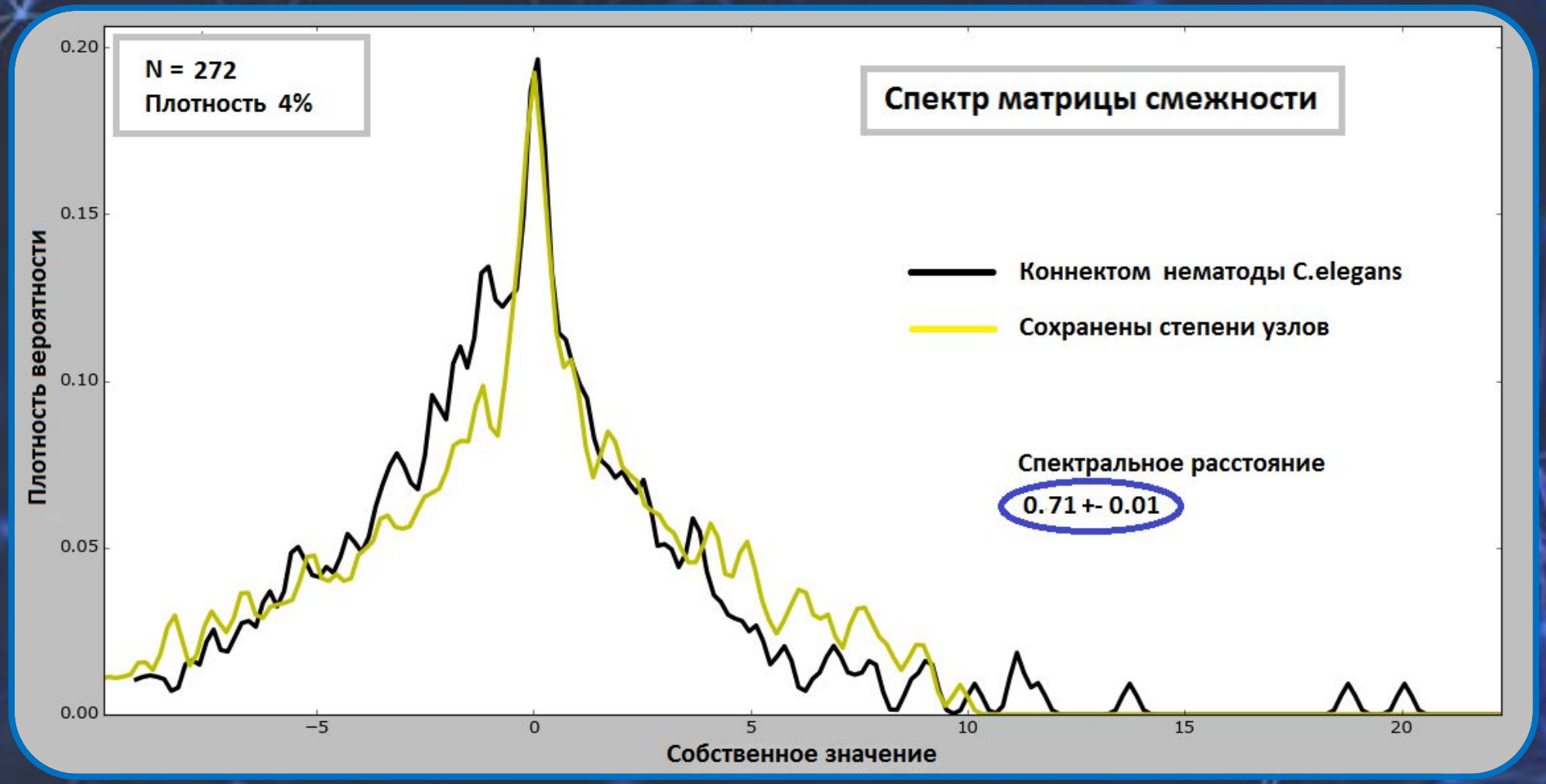
Полученные результаты

1. Сильные отличия коннектома человека от рандомизированной копии (в ср. с другими)

Расстояние между двумя спектрами (earth mover's distance)

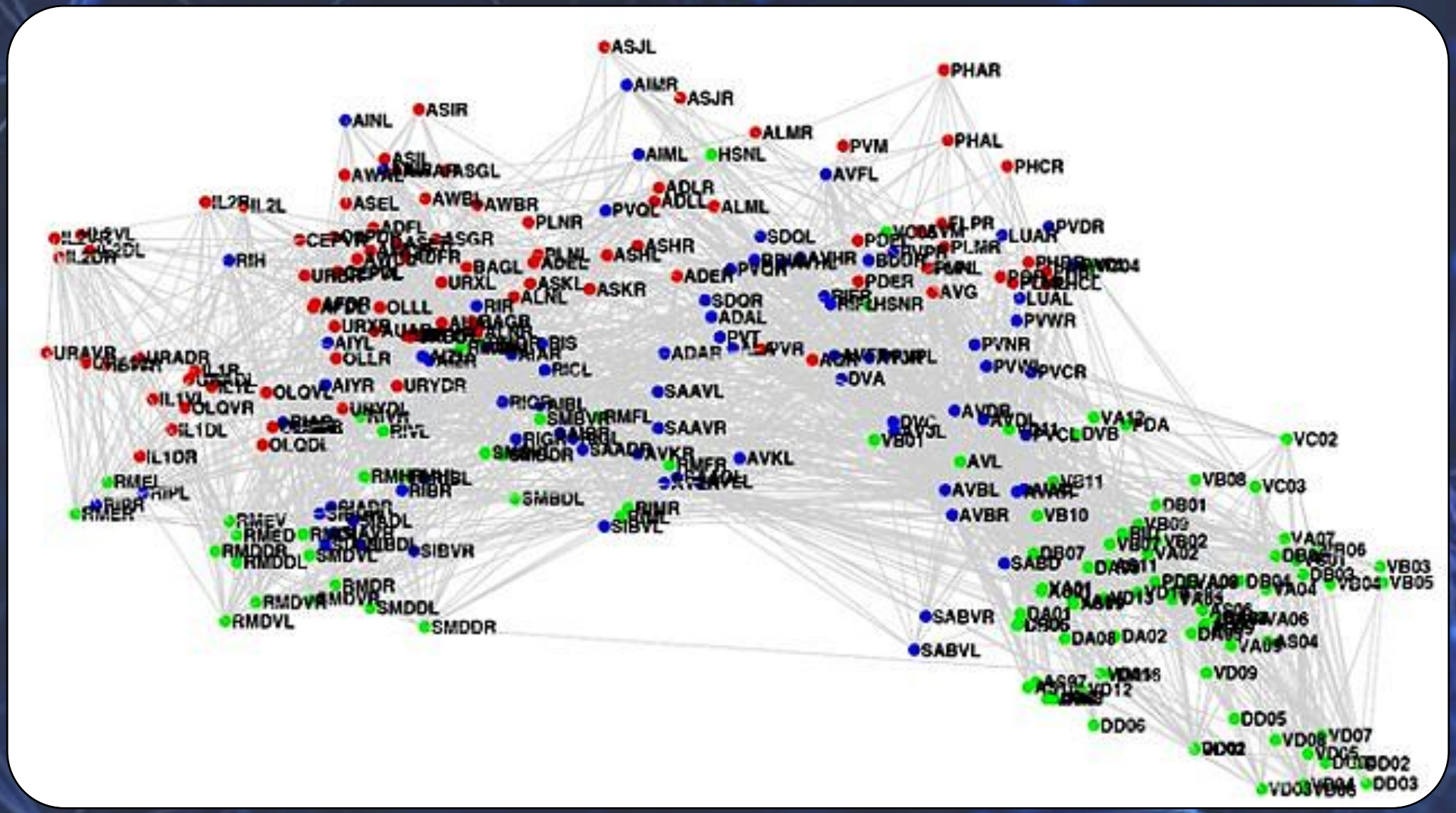
Спектр коннектома макаки и его рандомизированной копии

Сильно ли отличаются ли спектры сетей разных организмов от своих случайных аналогов?

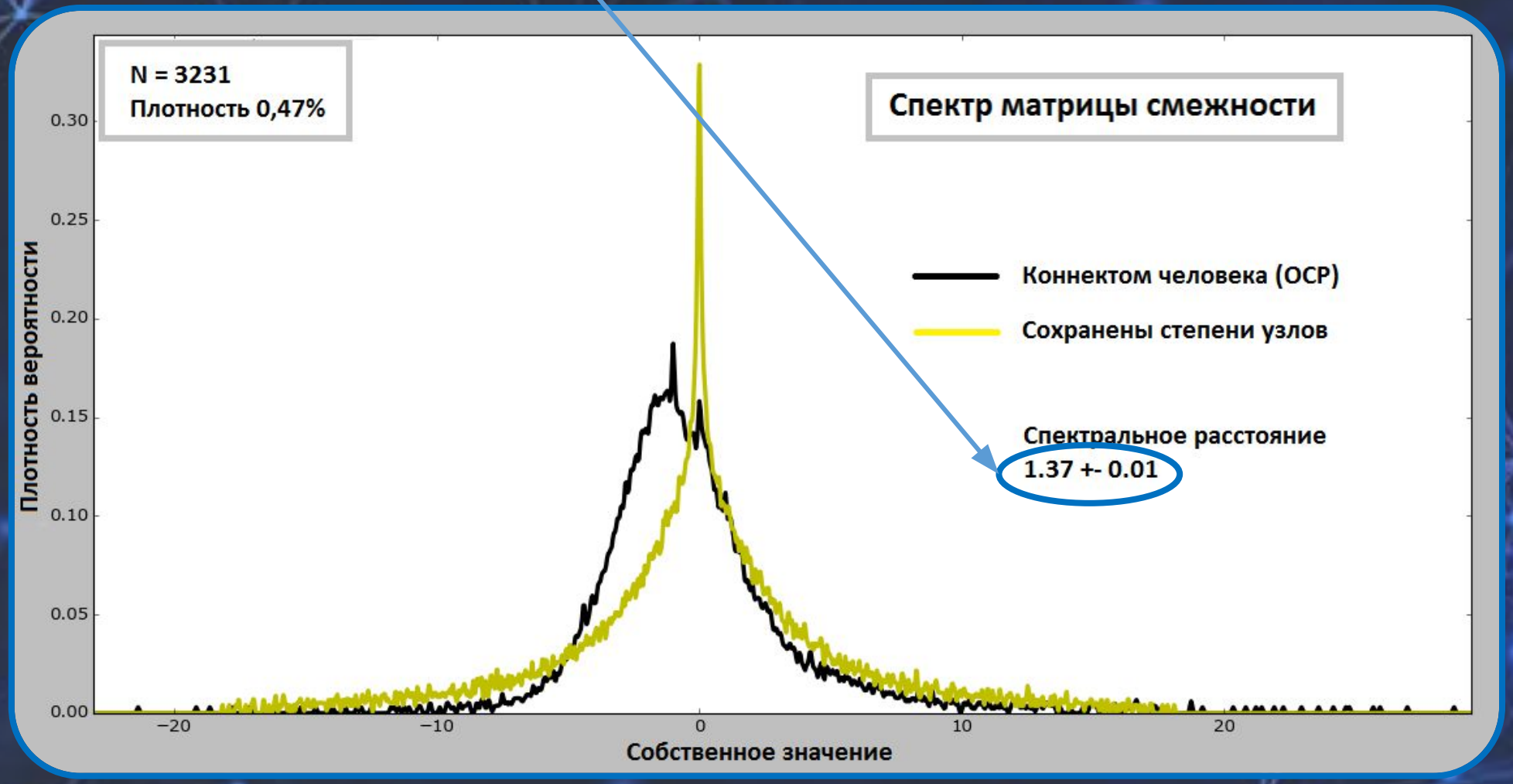


Спектр коннектома нематоды C.elegans и его рандомизированной копии

Коннектом нематоды C.elegans

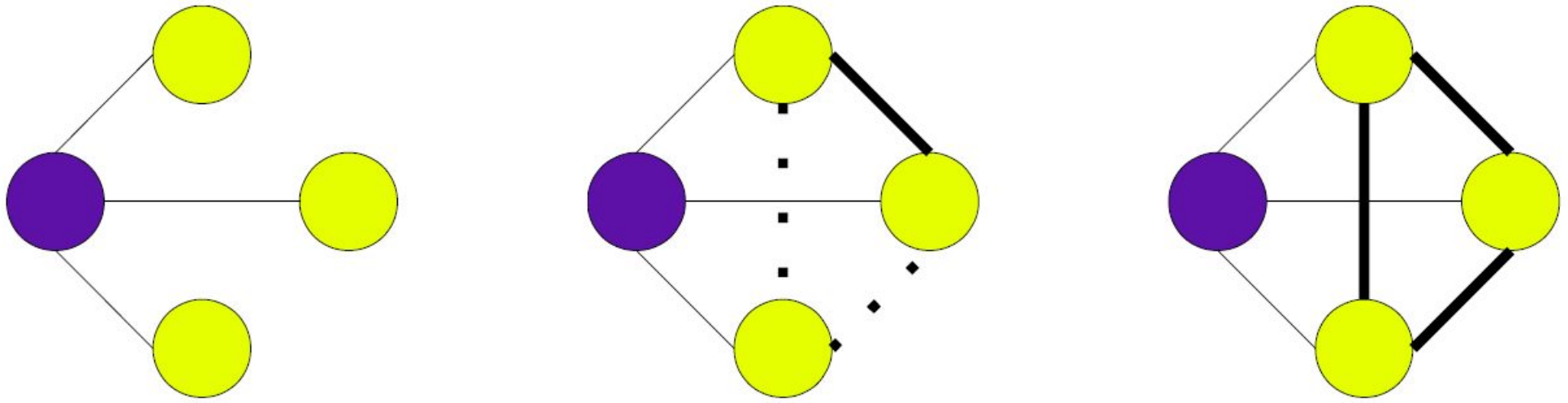


Коннектом человека сильнее отличается от своей случайной копии



Спектр коннектома человека и его рандомизированного аналога

2. Локальная кластеризация оказывает важное влияние на спектр



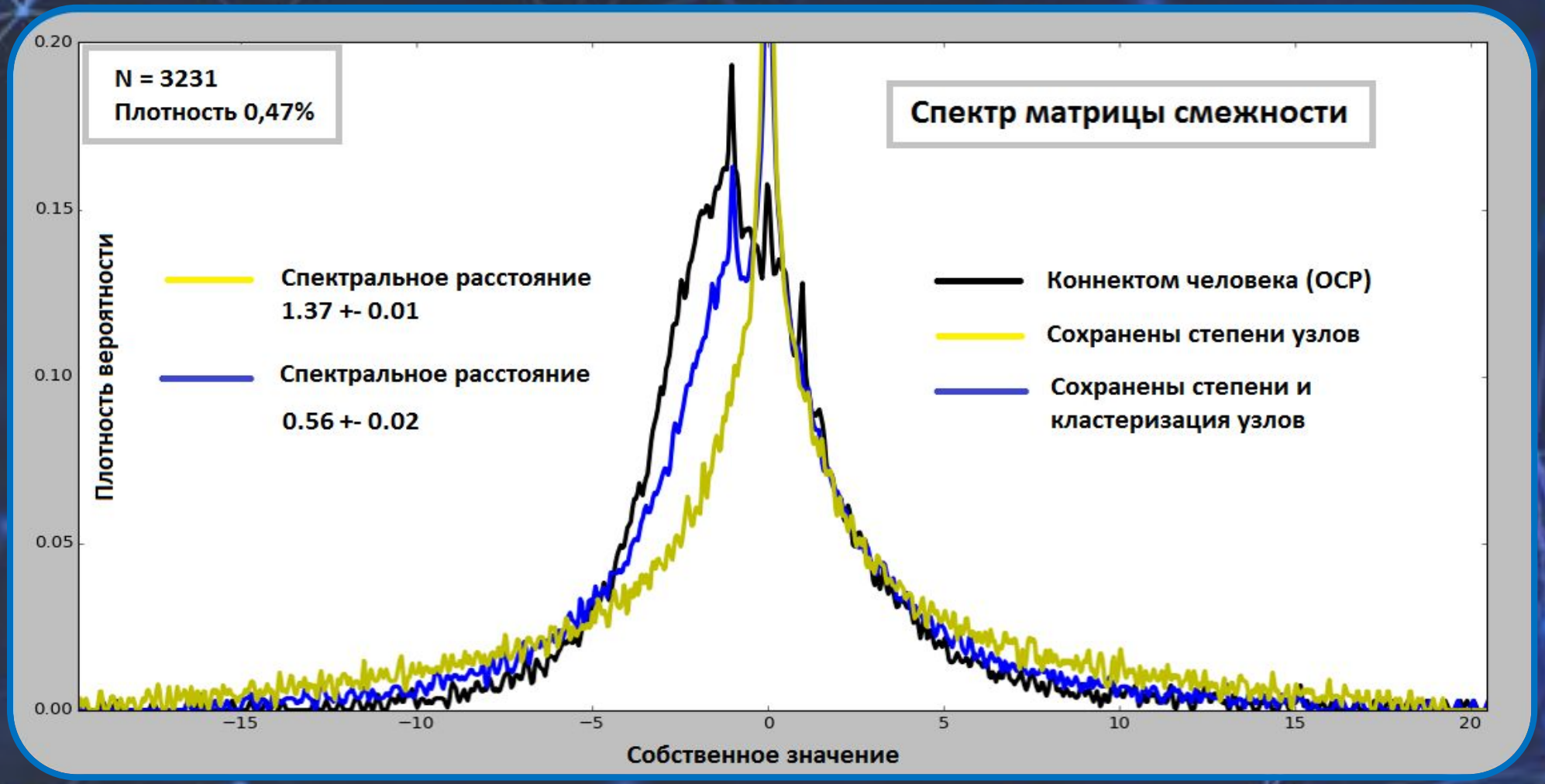
(a) Нет связей между соседями: **C = 0**

(b) Одна связь между соседями: **C = 1/3**

(c) Три связи между соседями: **C = 3/3**

Локальный коэффициент кластеризации

2. Локальная кластеризация оказывает важное влияние на спектр



Спектр коннектома человека и его рандомизированных аналогов

Выводы

1. Коннектом человека демонстрирует существенную неслучайность по сравнению с сетями других животных. Это может быть следствием эволюционного отбора, действующего на нервную сеть.

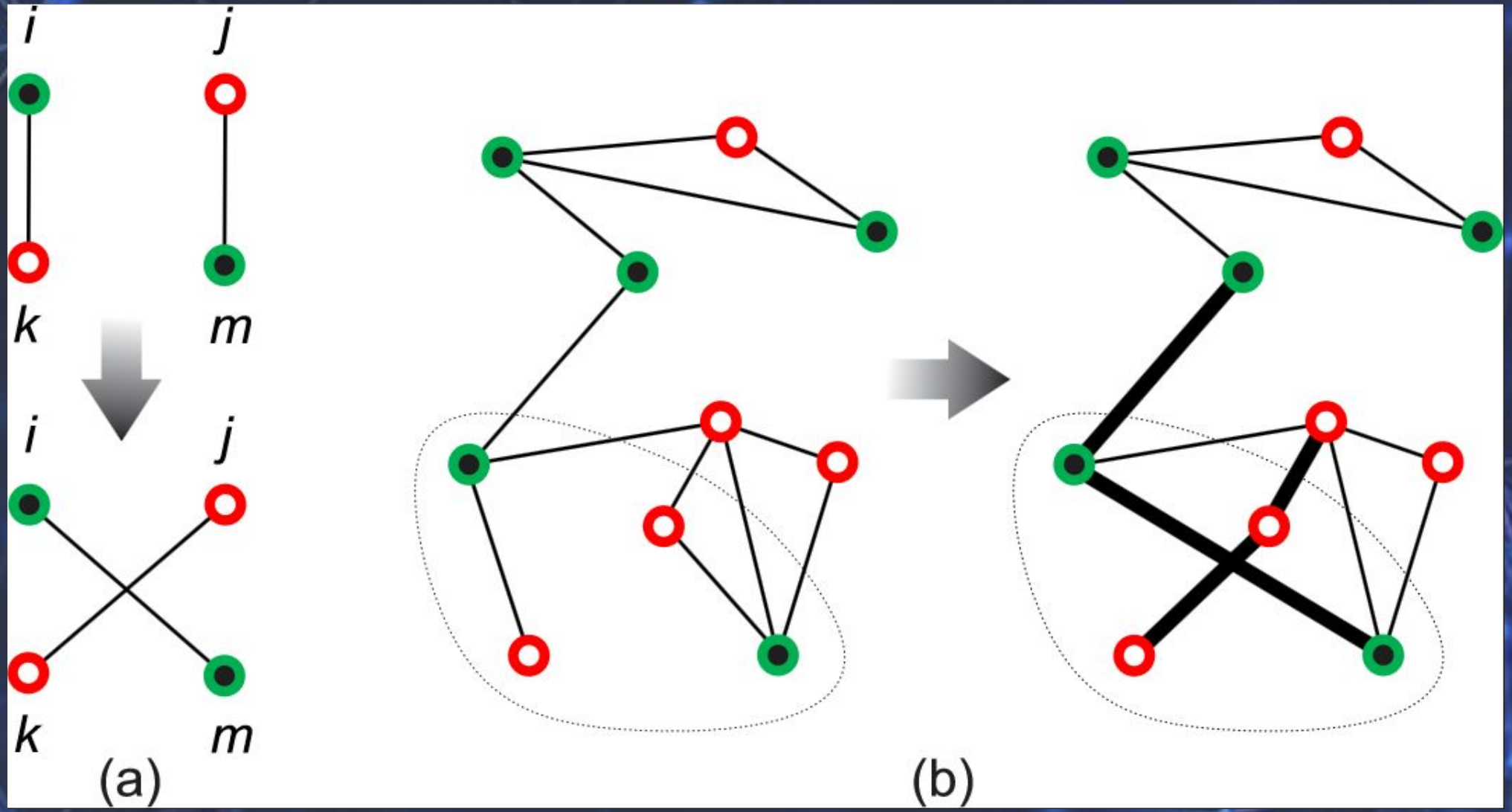
2. Локальная кластеризация во многом определяет форму спектра коннектома и, следовательно, играет важную роль в структуре исследуемых сетей.

Контакты

- Никита Поспелов:
  nik-pos@yandex.ru; VK, TG @niveous_dragon

- Сергей Константинович Нечаев, д. ф.-м. н., Directeur de Recherche au CNRS Université Paris-Sud:
  sergei.nechaev@gmail.com

- Константин Владимирович Анохин, член-корреспондент РАН, директор Центра нейронаук и когнитивных наук МГУ:
  k.anokhin@gmail.com

Спасибо за внимание!

Синхронизация подсетей