

Семинар по социофизике имени Д.С. Чернавского

<http://www.soc-phys.chem.msu.ru>



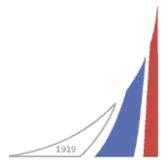
Анализ структуры магистральных электросетей
методами теории сложных сетей



к.э.н. Сергей Вячеславович Макрушин

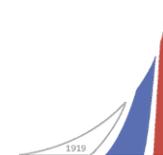
SVMakrushin@fa.ru

6 июня 2017 г.

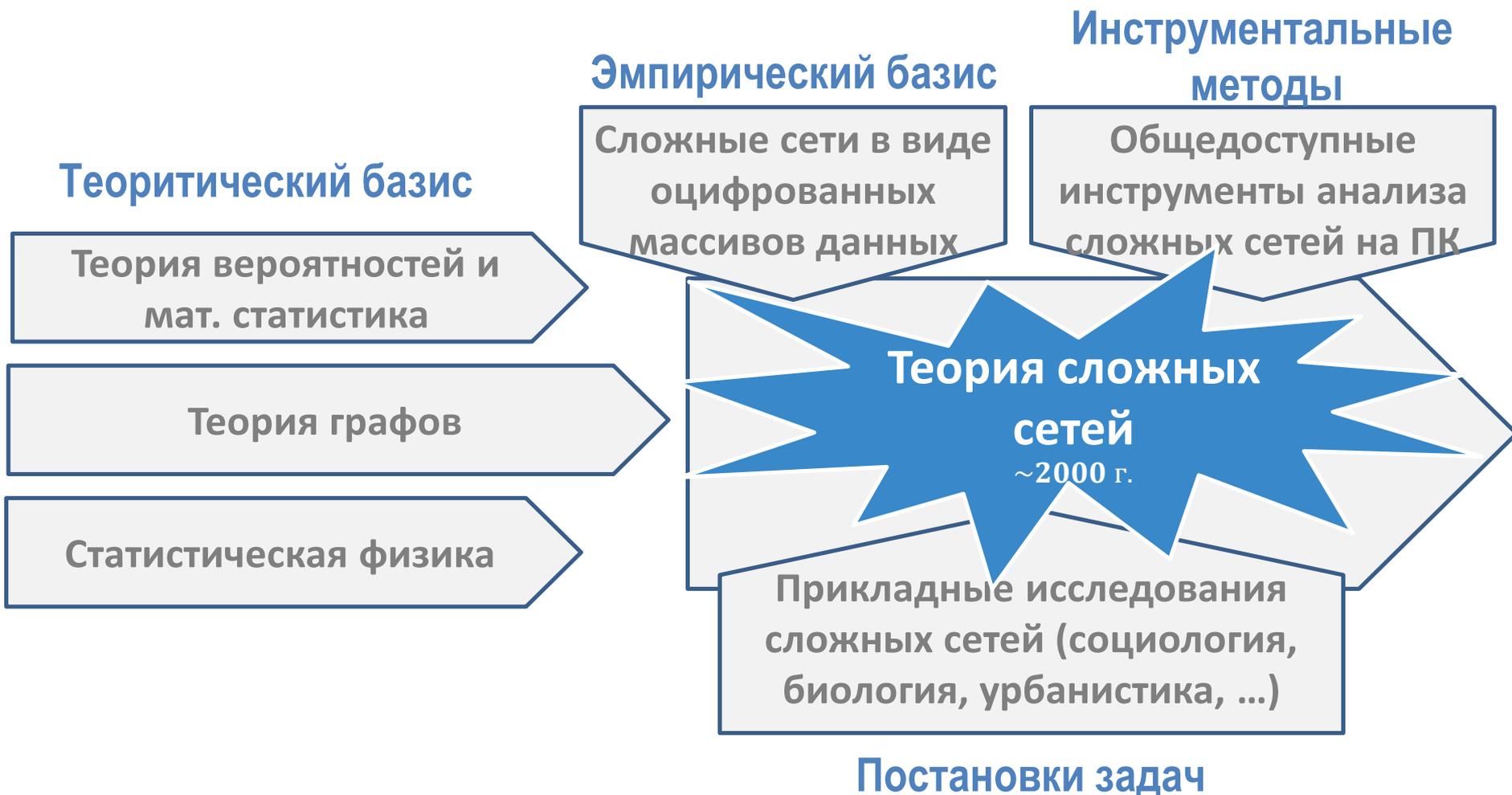


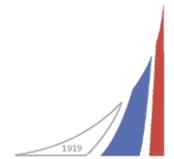
Введение в теорию сложных сетей





Новая дисциплина – теория сложных сетей (network theory, complex network theory) изучает сложные взаимодействующие системы, представимые в виде сети (графа) с большим количеством узлов.

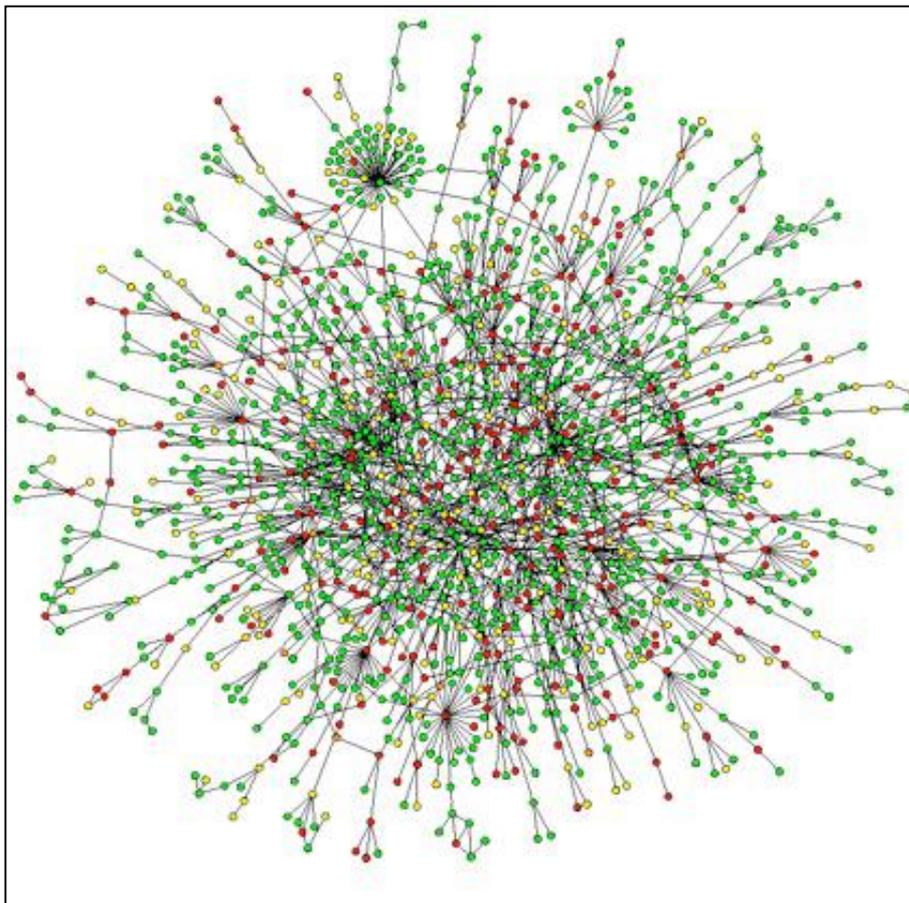
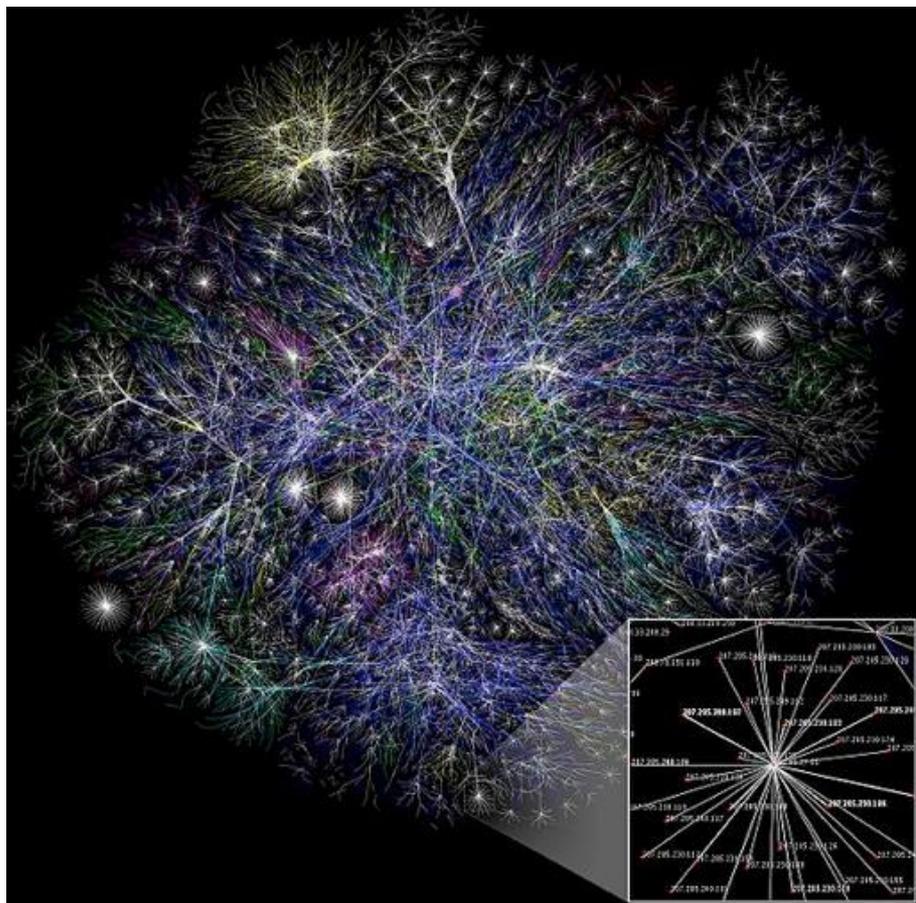
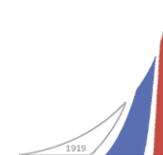




Теория сложных сетей является междисциплинарной теорией:

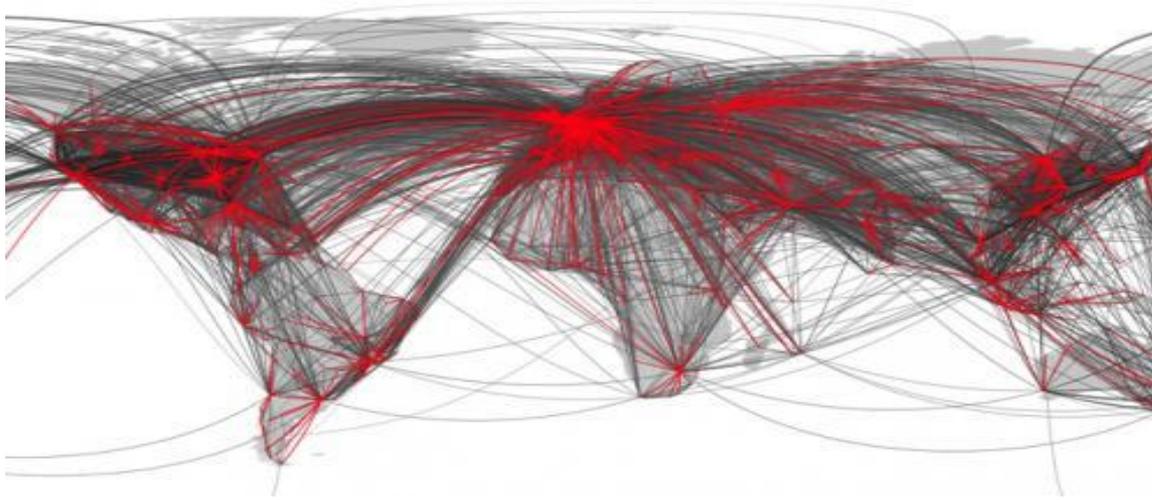
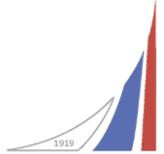
Примеры сложных сетей:

- Семантические сети: связь слов, понятий
- Биологические сети: взаимодействие белков, наследственная информация, нейронные сети
- Социальные сети, рекомендательные сервисы
- Бизнес, экономические, торговые, политические сети
- Интернет и веб-граф: связь между роутерами, веб-ссылки
- Коммуникационные сети: электронная почта, голосовая связь
- Транспортные сети: автодорожные сети, сети авиаперевозок
- Инфраструктурные сети: линии электропередачи, трубопроводы

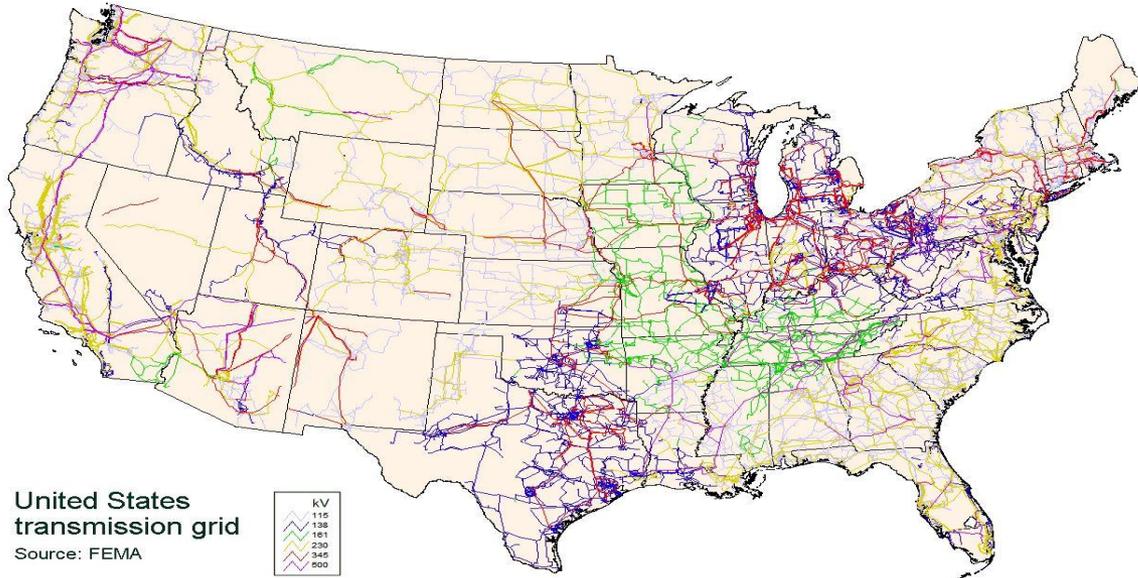


Физическая структура сети Интернет

Сеть взаимодействия протеинов



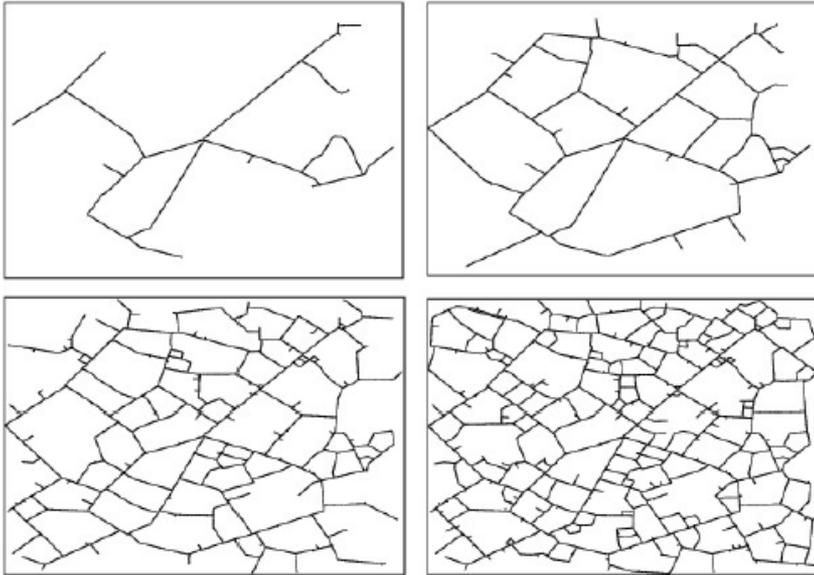
Сеть
авиамаршрутов



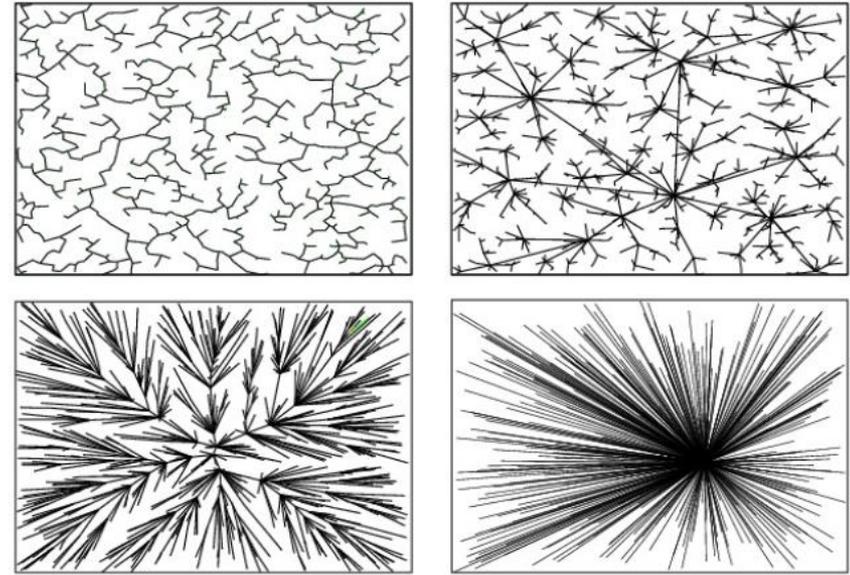
Магистральная
электросеть

Закономерности развития сложных сетей определяют появление в них ряда типовых структур, что делает продуктивным рассмотрение сетей различной природы в рамках общей теории

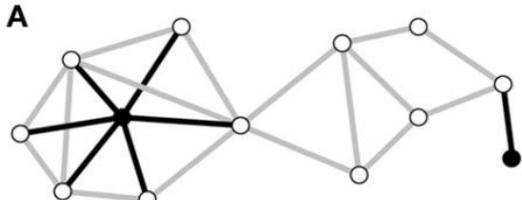
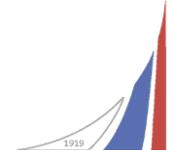
1. Сложные сети являются продуктом процесса роста, управляемого определенным набором правил.
2. Существует небольшой набор универсальных правил роста сетей, встречающихся в большом количестве сетей в различных предметных областях.
3. Схожесть правил, определяющих рост сетей, приводит к схожести структуры сложных сетей.
4. Схожесть структуры у сетей различной природы позволяет рассматривать их в рамках общей теории.



Пример роста сети: городская дорожная сеть

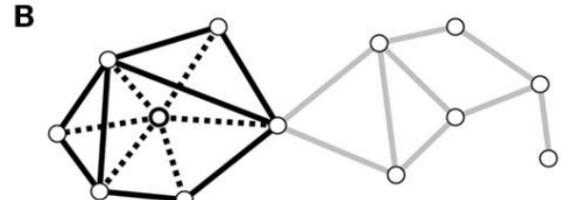


Пример ключевой роли правил, определяющих рост сети: различные настройки алгоритма роста сети на идентичном наборе узлов



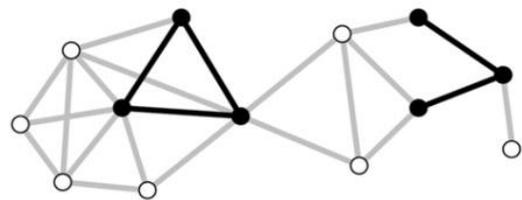
степень узла
node degree

С (средняя степень узлов)

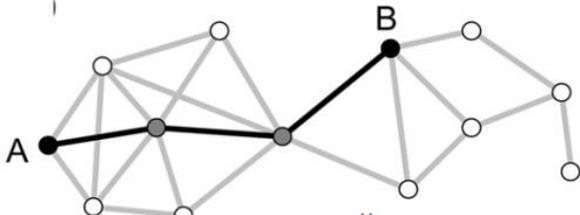


коэффициент кластеризации
clustering coefficient

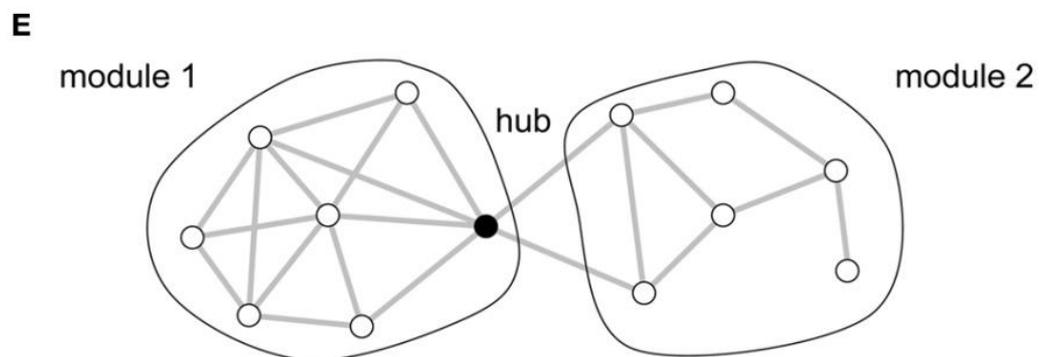
Д (средний коэффициент кластеризации)



МОТИВЫ
motifs



длина кратчайшего пути
path length and distance
(диаметр сети)

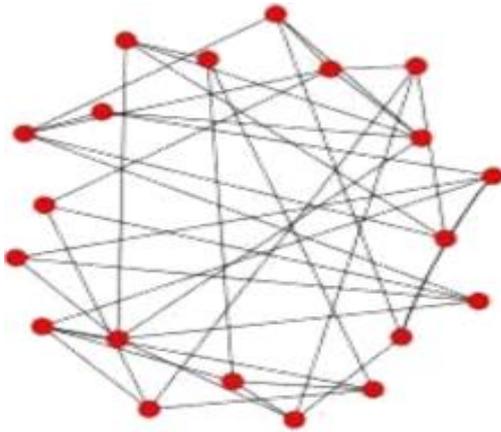


нагрузка узла (betweenness centrality)

Network	Average Degree	Average Clustering Coefficient	Diameter	Robustness
Power network	Very low	Very low	Medium	Easy to shatter
Wireless ad hoc network	Medium	High	Medium	Hard to shatter
Social network	High	High	Low	Very hard to shatter
Erdős-Rényi random network	Variable	Variable	Low	Hard to shatter
Random geometric graph	Medium	High	Large	Hard to shatter

Основные результаты теории сложных сетей базируются на анализе четырех базовых моделей сложных сетей

Случайный граф

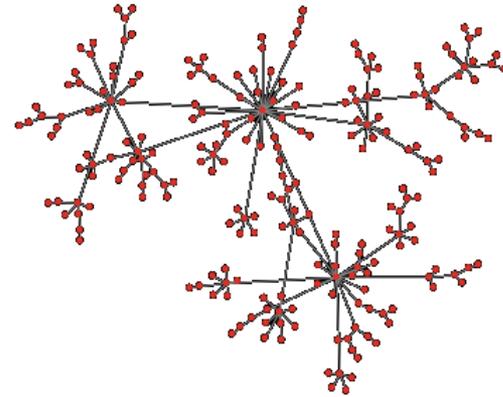


Правило роста:
случайное соединение узлов

Свойства:

- малая кластеризация
- малый диаметр

Безмасштабная сеть

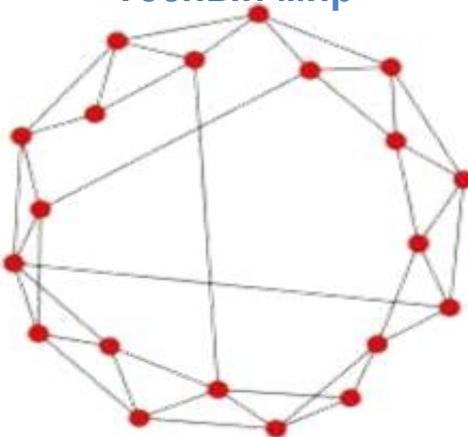


Правило роста:
предпочтительное присоединение к узлам с большим количеством связей

Свойства:

- малый диаметр
- наличие «хабов»

«Тесный мир»

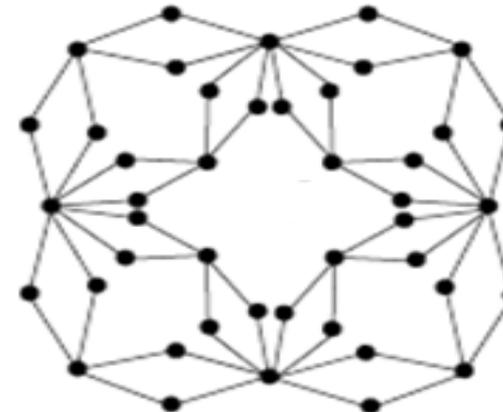


Правило роста:
связь с ближайшими соседями и небольшая доля «длинных связей»

Свойства:

- высокая кластеризация
- малый диаметр

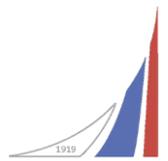
Самоподобная сеть



Правило роста:
воспроизводство однотипных структур на разных масштабах сети

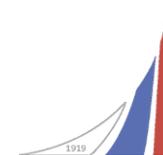
Свойства:

- большой диаметр
- отталкивание «хабов»

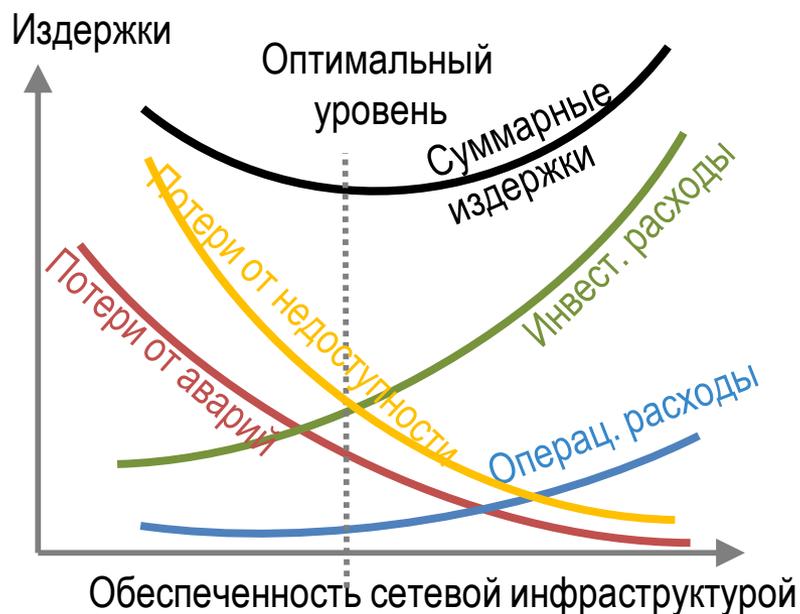


Магистральные электросети как объект анализа





Для инфраструктурных сетей задача поиска оптимального баланса между затратами на развитие и содержание сети и обеспечением доступности, надежности и качества предоставляемых сервисов не может быть полноценно решена без создания моделей пространственной структуры и топологии сети, позволяющих определить взаимосвязь между этими показателями.



Все составляющие интегральной экономической модели инфраструктурной сети зависят от ее топологии



Методы теории сложных сетей активно применяются для исследования свойств инфраструктурных сетей, в том числе магистральных электросетей

34 исследования магистральных сетей методами ТСС*

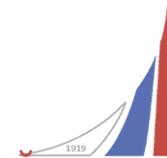
в **26** странах

11 исследований принадлежности к сетям тесного мира

Work	Sample Order	Sample Size	Average degree	Node Degree Distribution Statistics	Betweenness Distribution Statistics	Path Length Analysis	Weighted/Unweighted Analysis	Resilience Analysis	Small-world Investigation
[31]	~14000	~19600	~2.80	✓	✓		Unweighted	✓	
[32]	~300	~500	~3.33	✓	✓	Indirectly through efficiency metric	Weighted not based on physical properties	✓	
[33]	~314000	N.A.	N.A.	✓			Unweighted	✓	
[34]	~4800	~5500	~2.29	✓		✓	Unweighted	✓	✓
[35]	~2700	~3300	~2.44	✓			Unweighted	✓	
[36]	~3000	~3800	~2.53	✓		✓	Unweighted	✓	✓
[37]	~3000	~3800	~2.53	✓			Unweighted	✓	
[38]	~370	~570	~3.08			Indirectly through efficiency metric	Unweighted	✓	
[39]	~370	~570	~3.08	✓		✓	Unweighted	✓	
[24]	~4900	~6600	~2.69			✓	Unweighted		✓
[63]	~8500	~13900	~3.27	✓		✓	Unweighted and impedance analysis		✓
[40]	~4850	~5300	~2.18	✓	✓	✓	Both	✓	✓
[41] ²	~210	~320	~3.05			✓	Both	✓	✓
[42]	N.A.	N.A.						✓	
[43]	300	411	2.74				Both	✓	
[44]	~6400	~8700	2.72			✓	Unweighted	✓	✓
[45]	300	411	2.74	✓ (chart only)	✓		Both	✓	
[46]	~8500	~13900	~3.27	✓	✓		Unweighted	✓	
[48]	~900	~1150	~2.55	✓	✓		Weighted	✓	✓
[49]	~3200	~7000	~4.375	✓ (chart only)	✓				
[50]	~4900	~6600	~2.69						
[51]	~1700	~1800	~2.12						✓
[52]	~39	~46	~2.36						
[53]	~150	~46	~2.36						
[54]	~2556	~2892	~2.26						
[55]	~15400	~18368	~2.39	✓ (for one sample only)					✓
[56]	~550	~800	~2.91						
[57]	~14000	~19600	~2.80						
[58]	~90	~120	~2.67						
[59]	~550	~700	~2.55						
[60]	~29500	~50000	~3.39						
[61]	~400	~700	~3.5						✓
[62]	~900	~1300	~2.89						
[64]	~60	~110	~3.67				Unweighted		



* G. A. Paganì, M. Aiello (2011) The Power Grid as a Complex Network: a Survey. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 05/2011; 392 (11)



На данный момент уже сложились базовые подходы проведения исследований электросетей методами теории сложных сетей

Work	Resilience Analysis Type	Node attack	Edge attack	Grid improvement
[31]	Connectivity loss	✓		
[32]	Efficiency	✓		
[33]	Loss of load probability	✓	✓	
[34]	Influence on largest component size and path length	✓		✓
[35]	Robustness through mean degree, motifs and patch size analysis			
[36]	Influence on largest component size	✓		
[37]	Influence on largest component size e comparison with theoretical results	✓		
[38]	Damages and improvements		✓	✓
[39]	Nodes disconnection and improvements		✓	✓
[40]	Influence on largest component size	✓	✓	
[41]	Several criticality analysis and black-out models	✓	✓	
[42]	Reliability and disturbances			
[43]	Unserved energy/load	✓	✓	
[44]	Critical Path Length and clustering coeff.		✓	
[45]	Sensitivity			
[46]	Influence on largest spanning cluster size	✓		
[48]	Loss of load and failure endurance	✓		
[50]	Avalanche size	✓		
[52]	Flow availability		✓	
[53]	Efficiency		✓	
[54]	Largest power supply region	✓	✓	
[56]	Influence in network connectivity and power degradation		✓	
[57]	Efficiency	✓		
[58]	Efficiency, net-ability, overload		✓	
[59]	Efficiency, net-ability, overload		✓	
[60]	Path length, connectivity loss,	✓		
[61]	Line overload, cascade effects, network disruption		✓	✓
[62]	Overload, cascade effects, blackout size	✓		✓

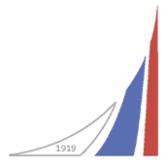
Методы и принципы анализа:

- использование основных моделей ТСС при анализе
- упрощенное моделирование физики процесса передачи электроэнергии
- анализ топологии и пространственной структуры сети
- построение динамических имитационных моделей

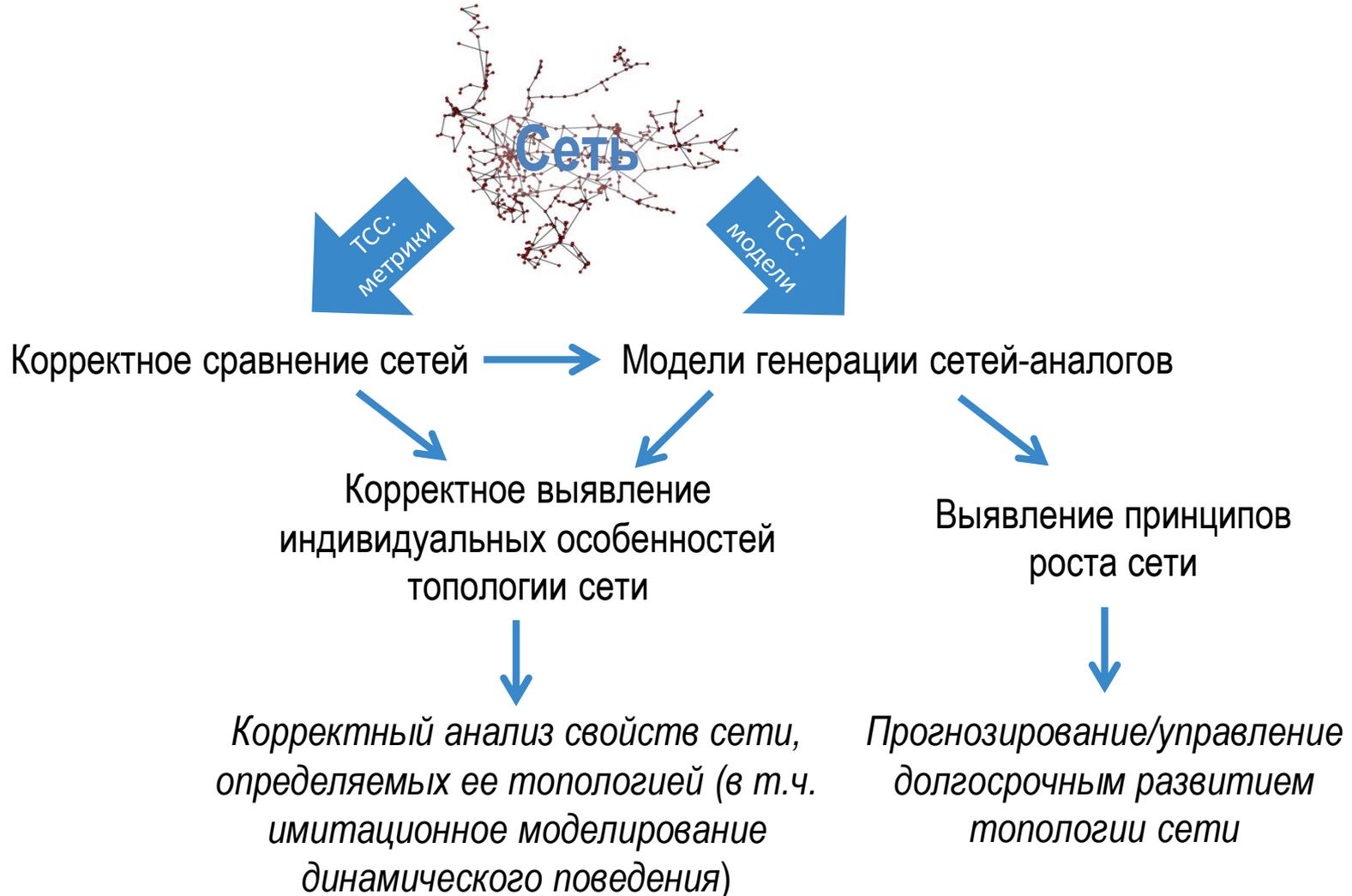
Тематика исследований электросетей методами теории сложных сетей

- случайные и преднамеренные повреждения сети
- каскадные отключения
- улучшение структуры сети

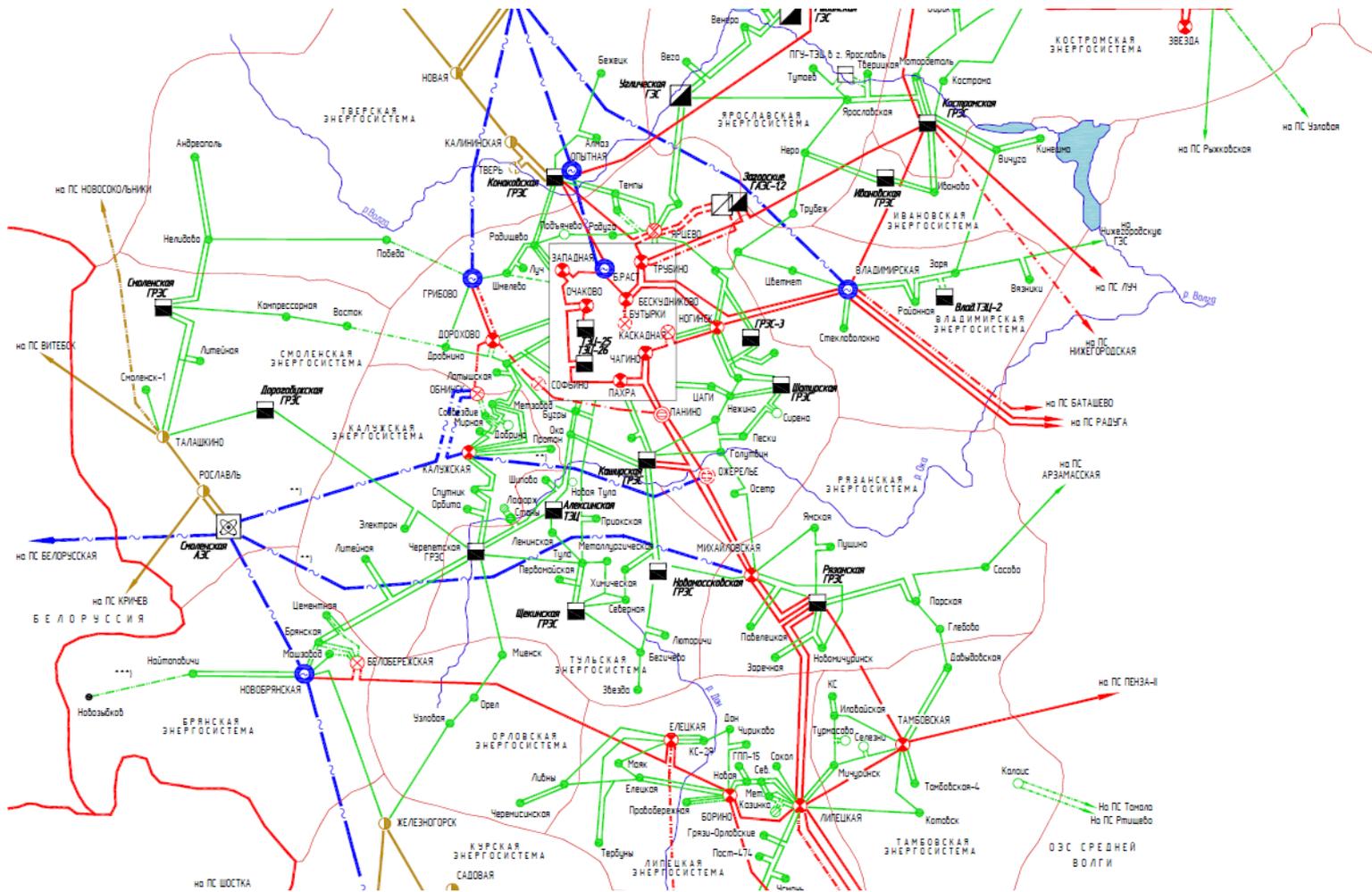
* G. A. Pagani, M. Aiello, *The power grid as a complex network: a survey*, 2012



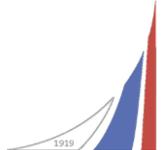
Методы теории сложных сетей позволяют на качественно новом уровне учитывать топологию реальной сети при анализе ее свойств и оценке перспектив развития сети



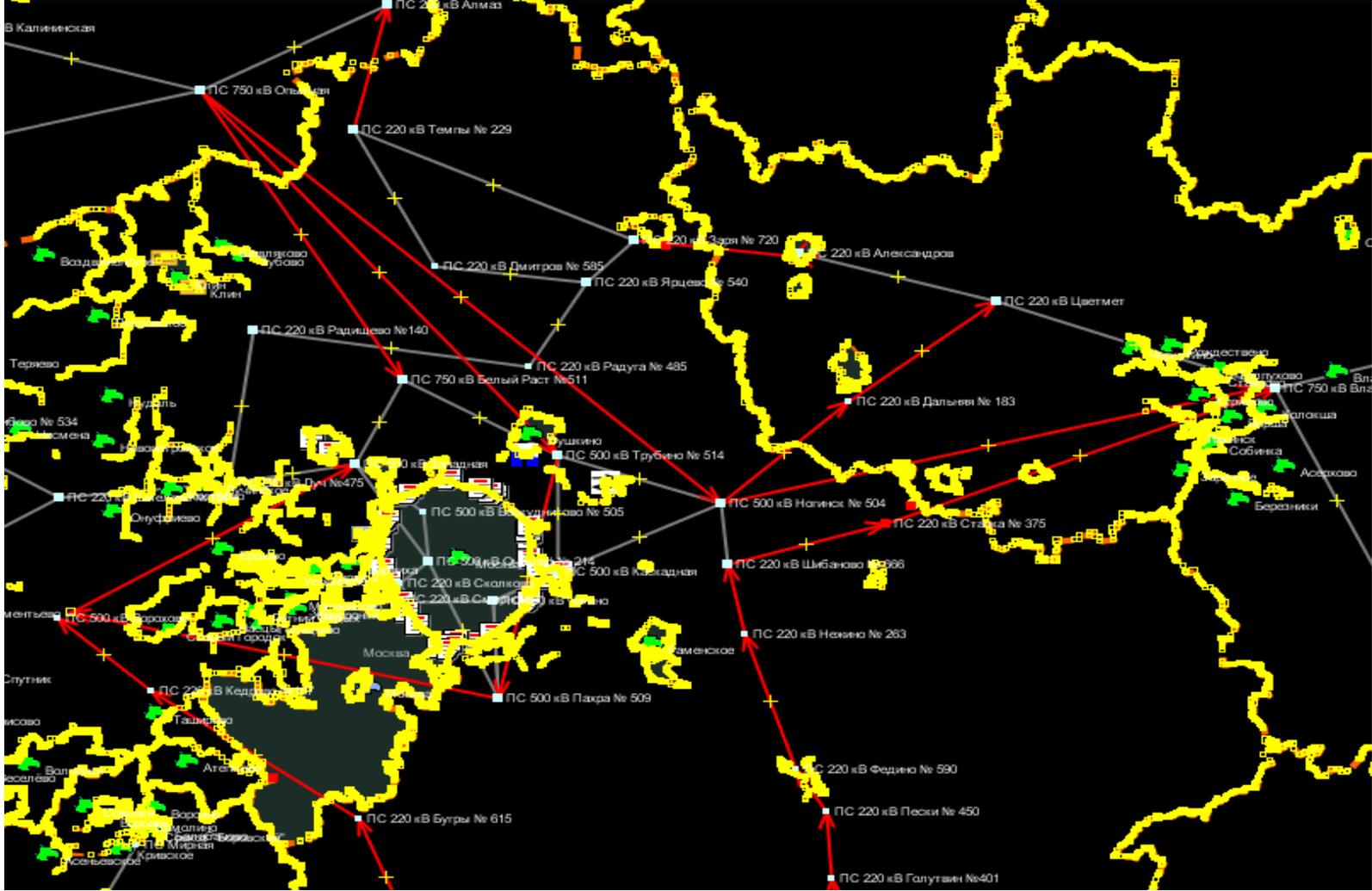
В 2013 г. были начаты исследования свойств ЕНЭС методами теории сложных сетей



Карты сети из схемы и программы развития ЕНЭС на 2013-2019 годы

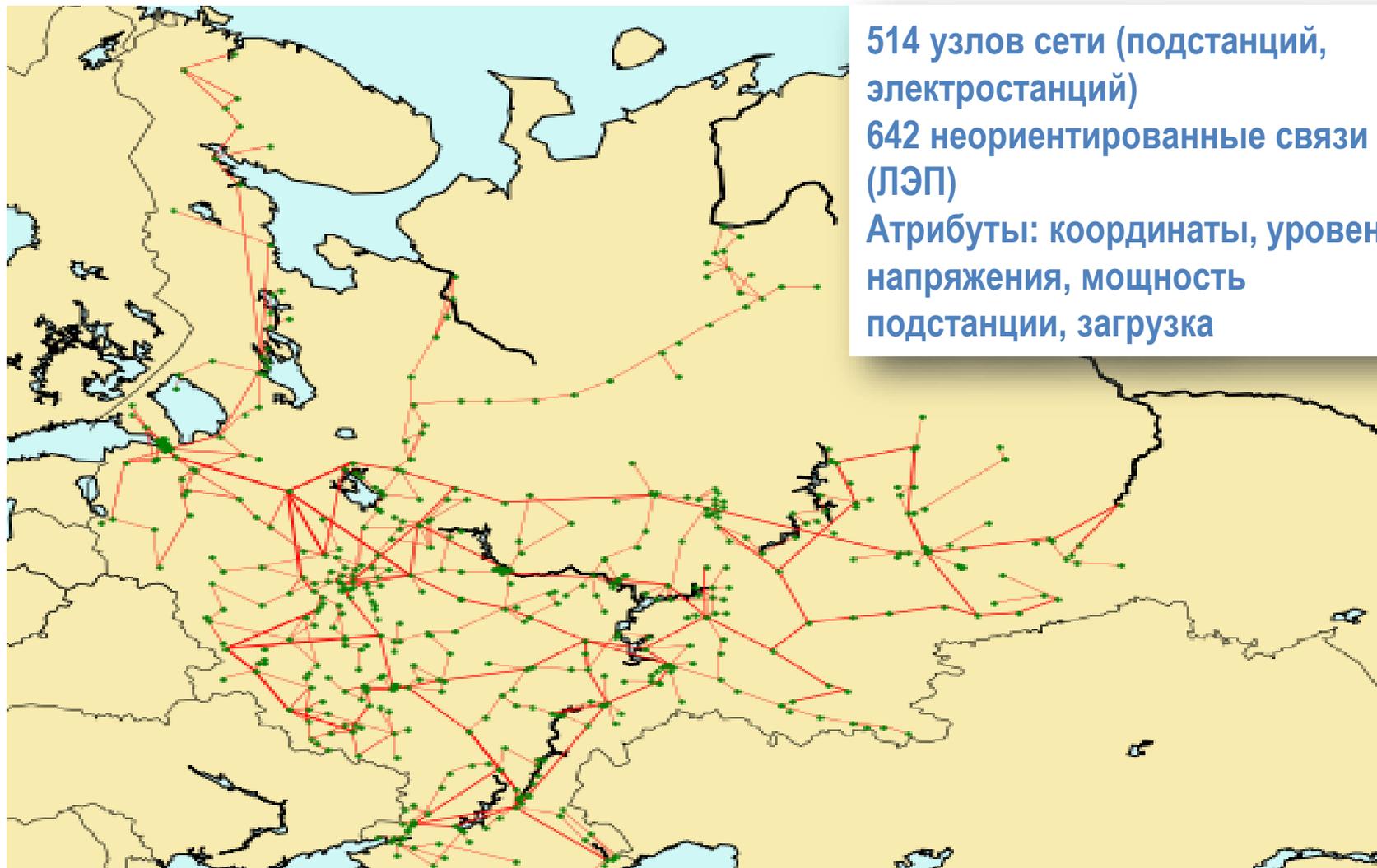


Ручное занесение узлов и связей ЕНЭС в ГИС с открытой базой данных.



Модель ЕНЭС в ГИС на базе OpenStreetMap

Компьютерная модель основных регионов присутствия ЕНЭС.



Модель ЕНЭС, использованная в исследовании

Сложные сети могут иметь различные характеристики, определяемые предметной областью рассматриваемой системы и решаемой задачей.

ориентированная

VS

неориентированная

у ЛЭП нет предпочтительного направления передачи электроэнергии

пространственная

VS

без пространственной привязки

Узлы сети имеют пространственную привязку, ЛЭП имеют маршрут

однородная

VS

неоднородная

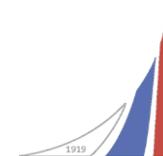
Узлы сети могут быть электростанциями или подстанциями с различными уровнями наивысшего напряжения

с дополнительными свойствами

VS

без дополнительных свойств

Уровень напряжения, мощность подстанций, вид ЛЭП, загрузка и т.п.



Полученные базовые характеристики сети отражают различные аспекты строения сети и важны для корректного сравнительного анализа электросетей

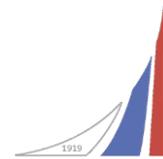
Расчитываемые характеристики	Размерность	По всей сети	МЭС Центра	МЭС Урала	МЭС Волги	МЭС Северо-Запада	МЭС Юга
общее количество ПС	шт.	524	184	91	111	109	28
общее количество ЛЭП	шт.	645	245	82	125	120	26
диаметр сети	переходов	36	21	22	13	18	12
среднее межузловое расстояние	переходов	11,9	9,4	8,2	5,8	6,4	5,3
средняя длина ЛЭП по координатам	км	74,4	66,4	73,3	70,0	68,3	62,8
максимальная степень узла	связей	9	8	8	9	6	5
средняя степень узла	связей	2,46	2,66	1,80	2,25	2,20	1,85
коэффициент кластеризации	вероятность	0,10	0,16	0,05	0,09	0,13	0,01

Компактность сети (по количеству ЛЭП между ПС)

Географическая близость ПС

Связность сети

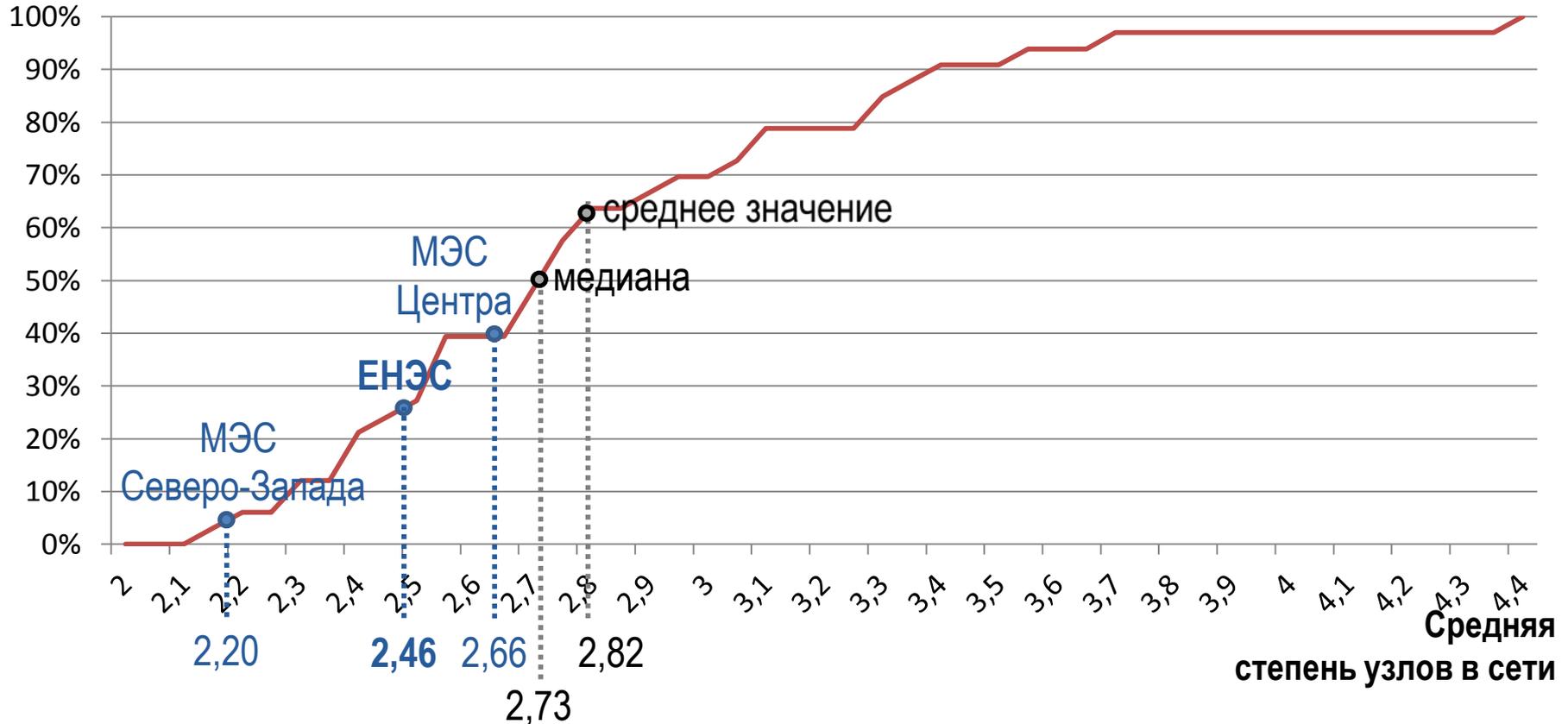
Распространенность колец из трех узлов



Сеть ЕНЭС по сравнению с большинством зарубежных аналогов является сильно разреженной

Распределение средней степени узлов в сети (по результатам 33 исследований)

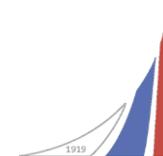
Доля сетей со средней степенью вершин, меньше заданного значения



Собраны данные для более точной модели ЕНЭС.

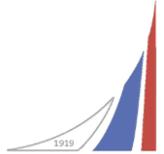


Перспективная модель ЕНЭС для будущих исследований

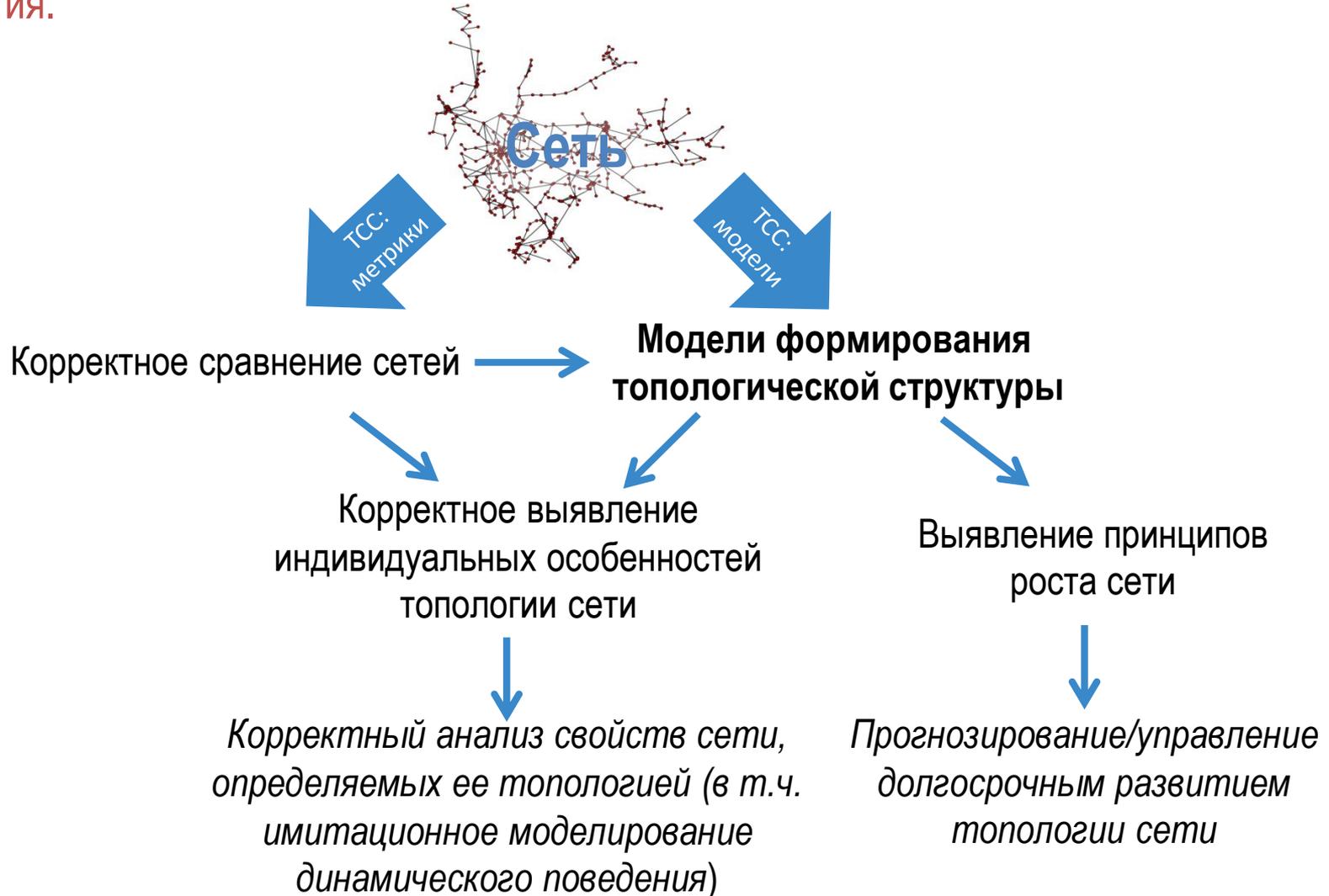


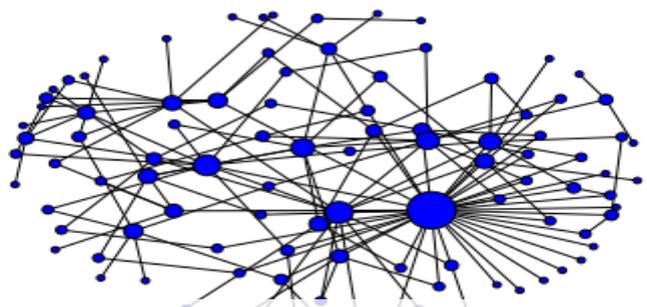
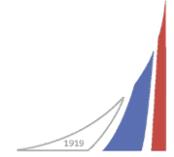
Поиск модели роста сети ЕНЭС



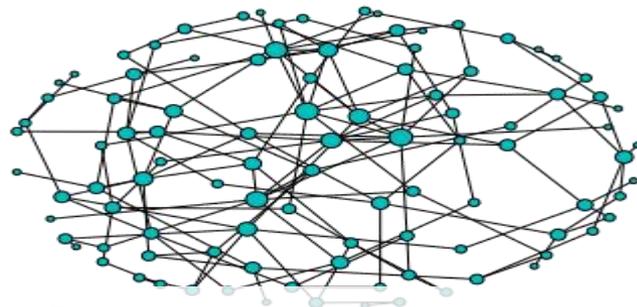


Использование моделей формирования топологической структуры сети позволит на качественно новом уровне проводить ее анализ и строить долгосрочные прогнозы ее развития.

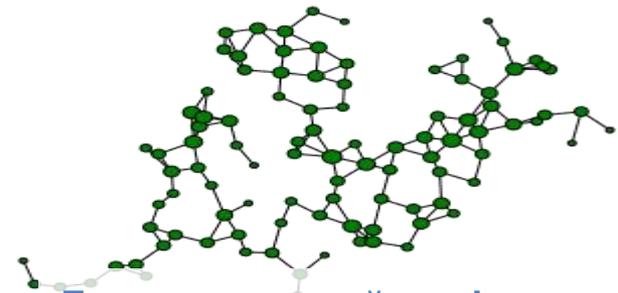




Безмасштабная сеть



Растущая случайная сеть



Геометрический граф

Правило роста сети:

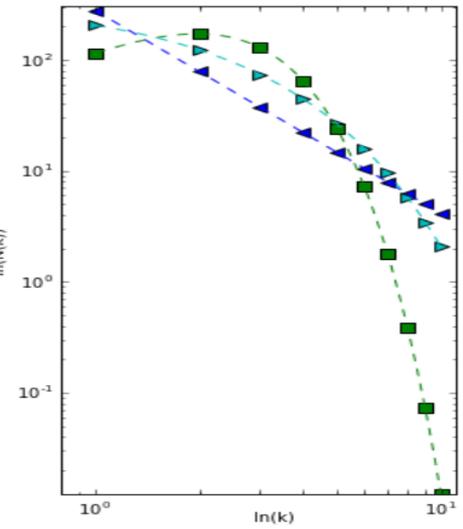
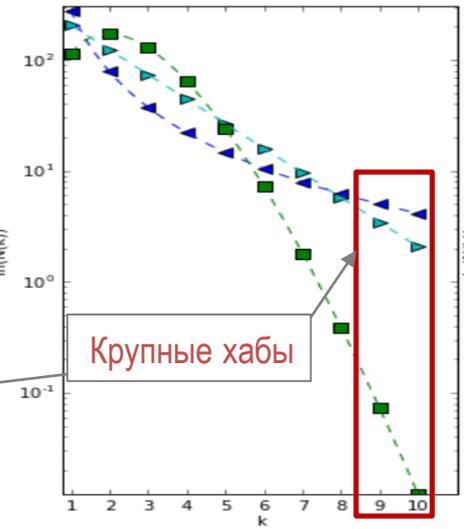
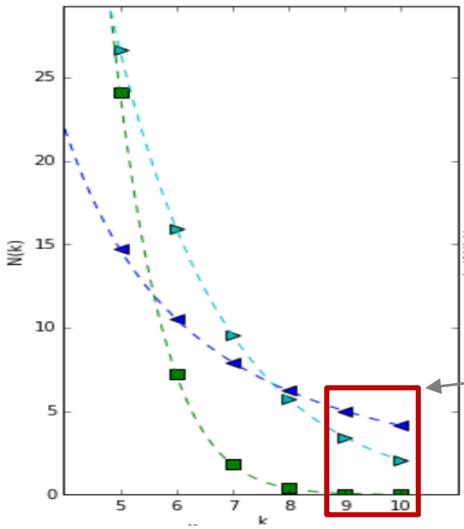
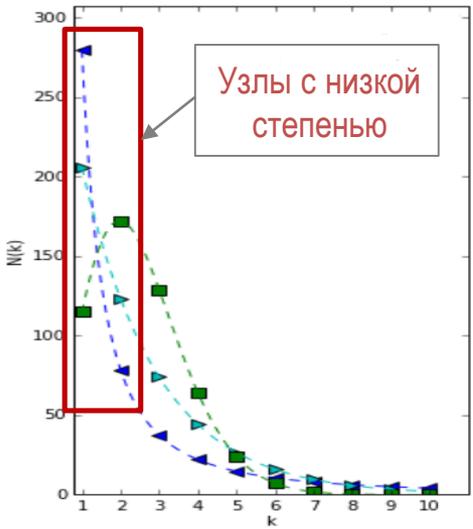
Узлы по очереди добавляются в сеть и связываются с уже существующими узлами ...

... предпочитая более «богатые» на связи узлы

... равновероятно со всеми узлами

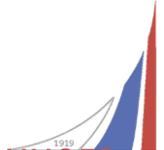
Узлы связываются со всеми узлами, находящимися не дальше заданного расстояния

Распределение степеней узлов для рассмотренных моделей в разных системах координат



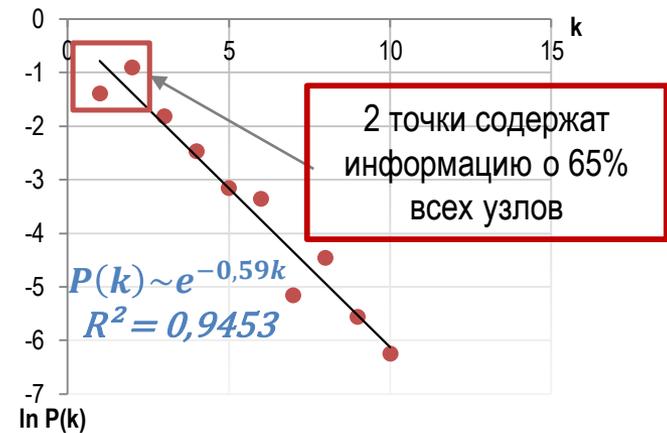
▶▶▶ Дзета р-е $P(k) \sim k^{-\gamma}$
▶▶▶ Геометрическое р-е $P(k) \sim e^{-\alpha k}$
■ р-е Пуассона $P(k) \sim e^{-\alpha k} / k!$

Во многих исследованиях магистральных электросетей при помощи регрессионного анализа идентифицировано экспоненциальное (геометрическое) распределение степеней узлов, но несмотря на высокий R^2 этот результат некорректен

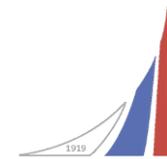


Cumulative Node Degree Distribution Probability Type	Fitted Distribution
Exponential	$y(x) \sim e^{-0.5x}$
Exponential	$y(x) = 2.5e^{-0.55x}$
Power-law	$y_1(x) = 0.84x^{-3.04}$ $y_2(x) = 0.85x^{-3.09}$
Exponential	$y_1(x) \sim e^{-0.81x}$ $y_2(x) \sim e^{-0.54x}$
Exponential	$y(x) \sim e^{-0.56x}$
Exponential	$y(x) \sim e^{-0.61x}$
Exponential or sum of exponential terms	$y_1(x) = e^{-0.18x^2}$ $y_2(x) = e^{-0.21x^2} + 0.18e^{-0.25(x-4)^2}$ $y_3(x) = 0.96e^{-0.17x^2} + 0.25e^{-0.19(x-3.9)^2}$
Sum of truncated geometrical and irregular discrete terms	$y_1(x) \sim f_1(x)$ $y_2(x) \sim f_2(x)$
Power-law (unweighted) and sum of exponential terms (weighted)	$y_1(x) \sim x^{-1.49}$ $y_2(x) \sim 0.15e^{-21.47x} + 0.84e^{-0.49x}$
Exponential	$y_1(x) \sim e^{-0.65x}$ $y_2(x) \sim e^{-0.58x}$
Exponential	$y(x) \sim e^{-0.5x}$

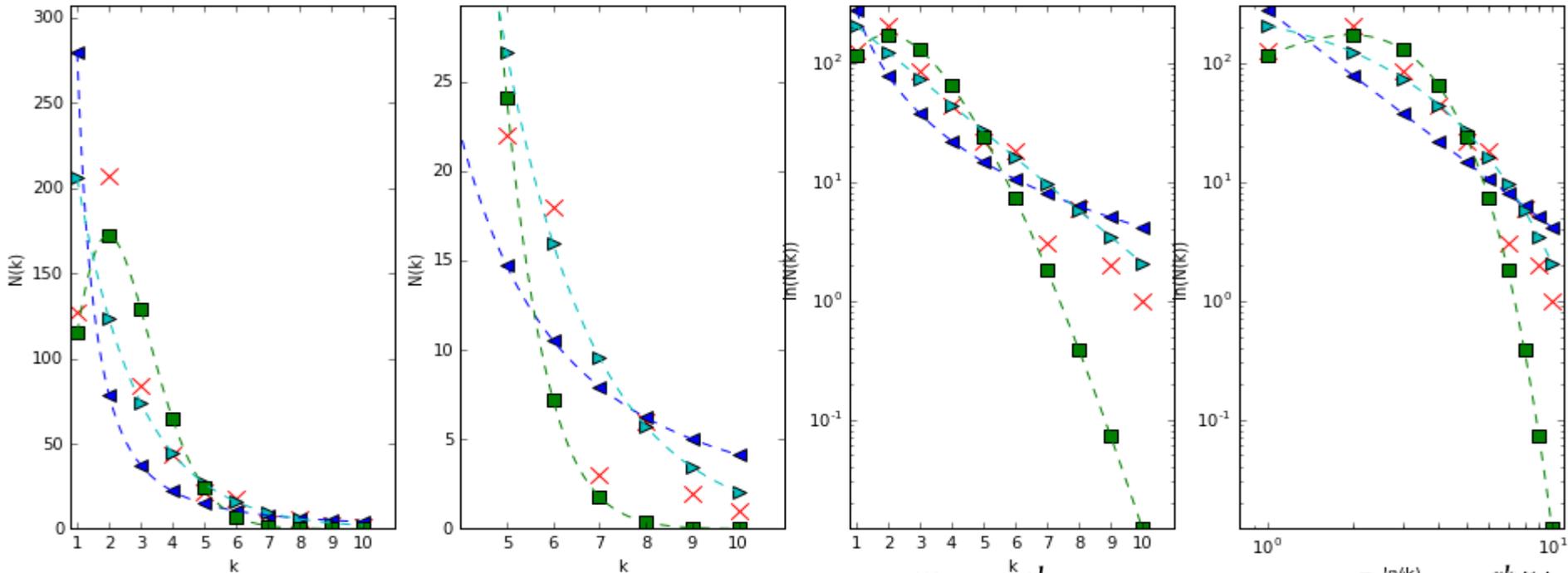
Анализ распределения степеней узлов сети ЕНЭС (геометрическое распре-ние)



В данном случае регрессионный анализ некорректен, т.к. не выполняются условия теоремы Гаусса-Маркова: имеется гетероскедастичность остатков. Для оценки соответствия наблюдаемой выборки дискретному закону распределения подходят методы, основанные на функции максимального правдоподобия, такие как информационный критерий Акаике и Байесовский информационный критерий.

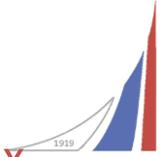


Визуальный анализ эмпирического распределения для ЕНЭС показывает его близость к распределению Пуассона для малых степеней вершин и близость к геометрическому распределению для больших степеней вершин.

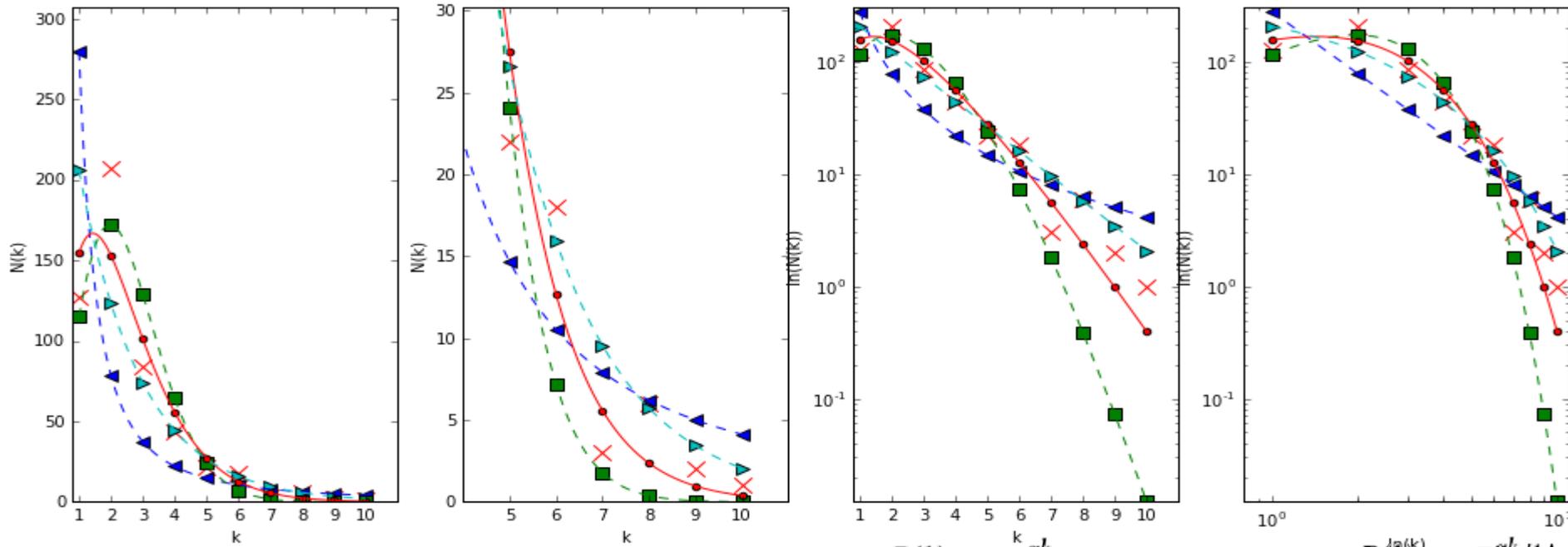


▶▶▶ Дзета р-е $P(k) \sim k^{-\gamma}$
 ▶▶▶ Геометрическое р-е $P(k) \sim e^{-ak}$
 ■ Пуассона $P(k) \sim e^{-ak}/k!$
✕✕✕ Сеть ЕНЭС (факт)

Распределение	Оптимальные параметры	ln функции правдоподобия	AIC	BIC	χ^2	P-значение
Дзета	$\gamma = 1.83$	-1025,7	2053,4	2057,6	430,5	7,73E-91
Пуассона	$\lambda = 1.49$	-856,8	1715,6	1719,8	88,2	1,57E-17
Геометрическое	$p = 0.40$	-864,3	1730,6	1734,8	95,1	5,57E-19

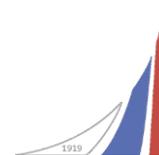


Отрицательное биномиальное распределение при определенных параметрах близко к распределению Пуассона для малых значений и близко к геометрическому распределению для больших значений случайной величины, что делает его хорошим кандидатом для приближения фактического распределения степеней узлов ЕНЭС.



▶▶▶ Дзета p -е $P(k) \sim k^{-\gamma}$
 ▶▶▶ Геометрическое p -е $P(k) \sim e^{-\alpha k}$
 ■ p -е Пуассона $P(k) \sim e^{-\alpha k} / k!$
✕✕✕ Сеть ЕНЭС (факт)
 ●●● Отрицательное биномиальное p -е

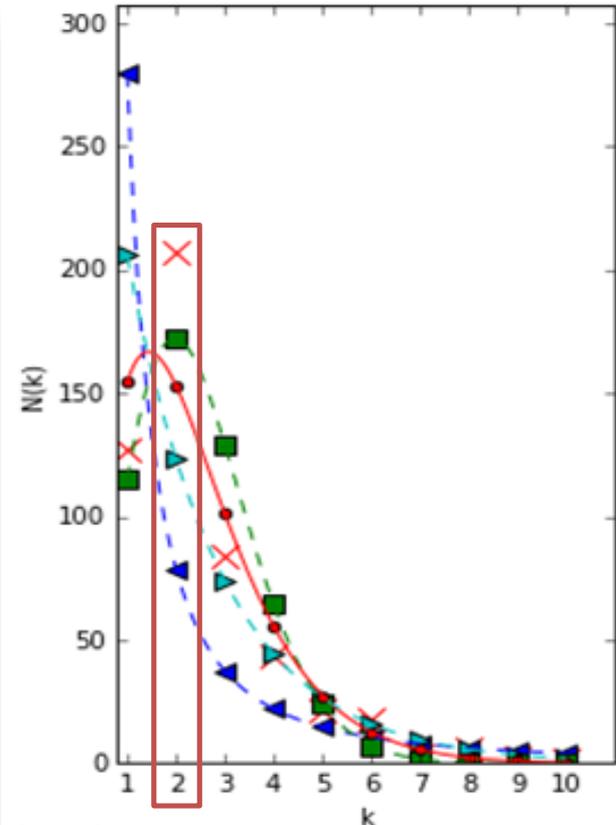
Отрицательное биномиальное распределение (распределение Паскаля) имеет вид $P(k) = C_{r+k-1}^{r-1} (1-p)^k p^r$ и определяется как количество неудач в последовательности испытаний Бернулли с вероятностью успеха p , проводимой до r успехов.



Отрицательное биномиальное распределение наилучшим образом среди рассматриваемых распределений приближает распределение степеней вершин сети ЕНЭС, однако критерий согласия Пирсона не позволяет принять гипотезу о распределении рассматриваемой величины по этому закону.

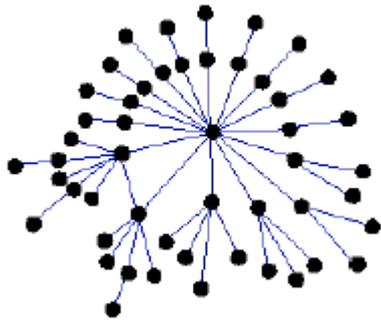
Распределение	Оптимальные параметры	$\ln \phi$ -и правдоподобия	AIC	BIC	χ^2	P-значение
Дзета	$\gamma=1.83$	-1025,7	2053,4	2057,6	430,5	7,73E-91
Пуассона	$\lambda=1.49$	-856,8	1715,6	1719,8	88,2	1,57E-17
Геометрическое	$p=0.40$	-864,3	1730,6	1734,8	95,1	5,57E-19
Отрицательное биномиальное	$r=3, p=0.67$	-834,4	1672,8	1681,3	33,1	1,13E-06

Для магистральной электросети характерно использование цепочек транзитных узлов, т.к. транзитные узлы обеспечивают доступ к сети на протяжении всей цепи и позволяют применять более низкие уровни напряжения для соединения отдаленных участков сети



Особая роль транзитных узлов не учитывается рассмотренными ранее универсальными моделями роста сети

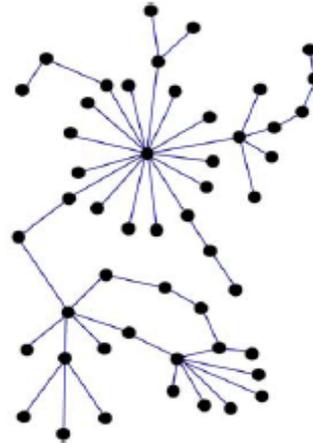
Ассортативность (assortativity) - тенденции узлов сети соединяться с другими узлами того же типа. В узком смысле – тенденция связываться с узлами с тем же (близким) числом связей.



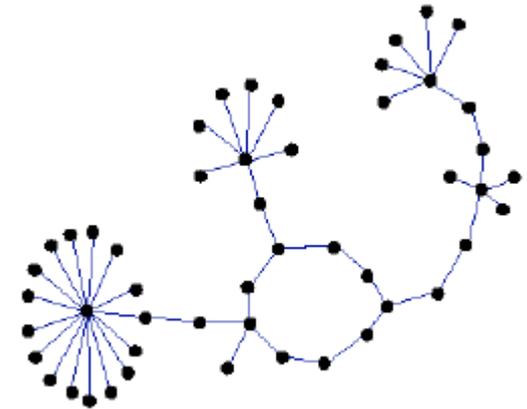
Ассортативность: сильное «притяжение» между хабами

- очень компактные сети
- хабы соединяются с хабами

Примеры:
Internet (физический уровень),
социальные сети



Случайное связывание

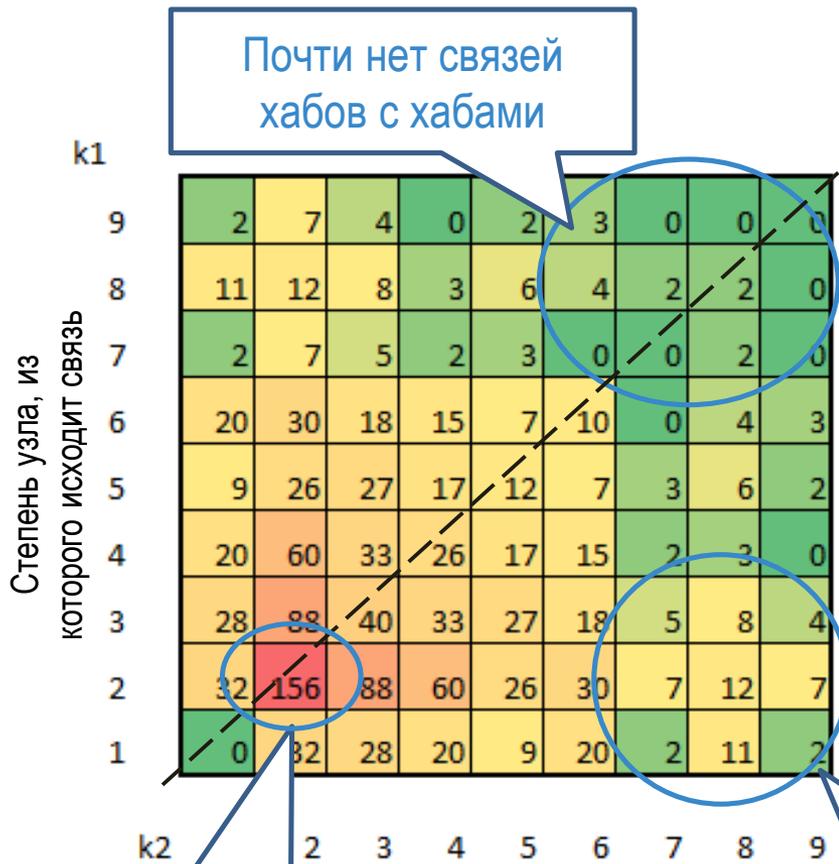


Дисассортативность: сильное «отталкивание» между хабами

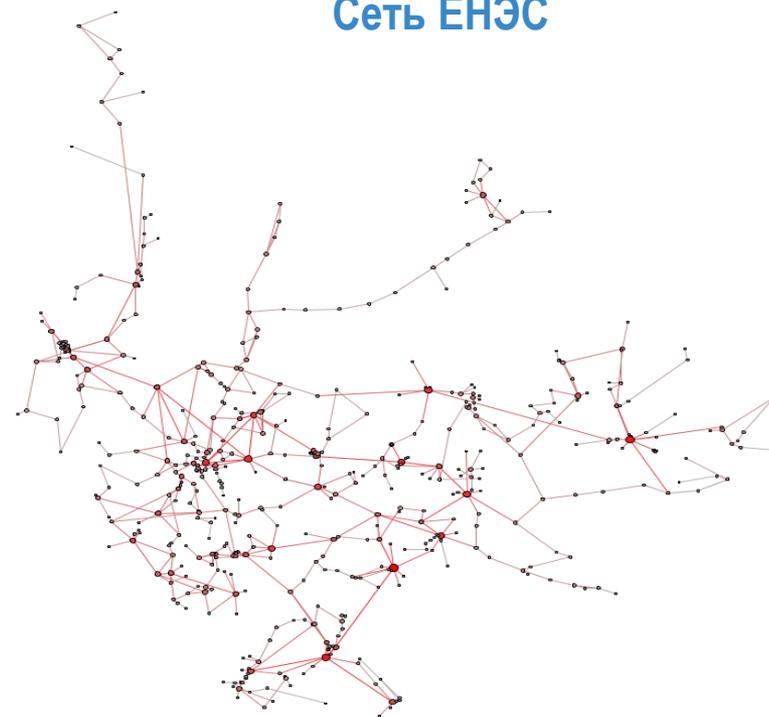
- менее компактные сети
- хабы соединяются с обычными узлами

Примеры: WWW, метаболические,
генетические, нервные сети

Диаграмма корреляции степеней связанных узлов для ЕНЭС показывает, что для сети характерна дисассортативность - стремление узлов связываться с узлами другого типа

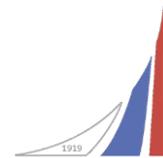


Сеть ЕНЭС



В сети очень распространены линейные структуры

Хабы связываются с узлами с низкой степенью

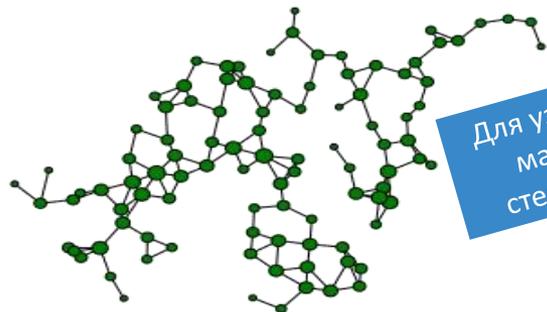


Модель формирования сети с отрицательным биномиальным распределением степеней узлов на данный момент не разработана, но анализ указывает, что близкое распределение можно получить в моделях, использующих геометрический и исторический принцип роста сети.

Геометрический принцип роста сети

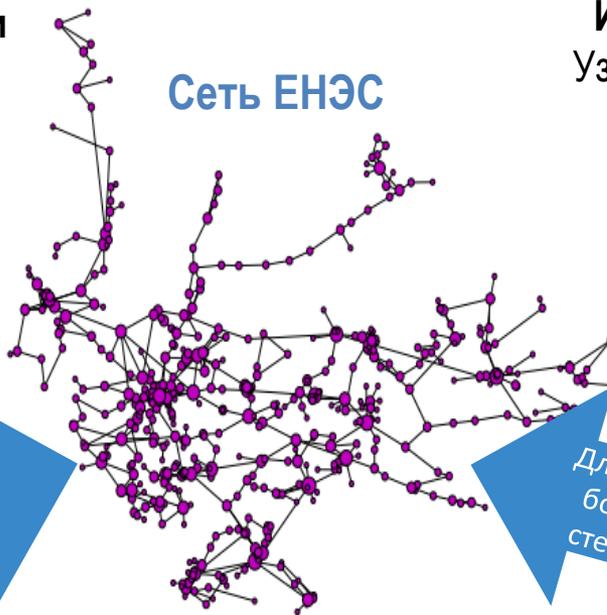
Узлы связываются со всеми узлами, находящимися не дальше заданного расстояния

Дзета распределение степеней узлов



Для узлов с малой степенью

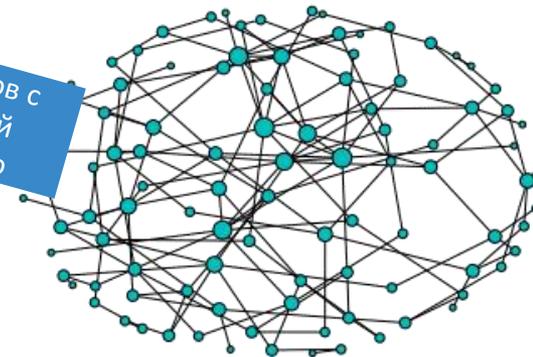
Сеть ЕНЭС



Исторический принцип роста сети

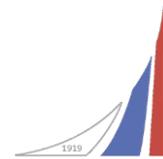
Узлы по очереди добавляются в сеть и равновероятно связываются с уже существующими узлами

Геометрический закон распределения степеней узлов



Для узлов с большой степенью

Распределение степеней узлов, близкое к отрицательному биномиальному закону (отдельно нужно учитывать особую роль транзитных узлов)



Из ad-hoc моделей формирования топологической структуры магистральных электросетей геометрический и исторический принцип сети наиболее явно проявляется в модели RGM*, являющейся развитием модели растущей случайной сети с упором на оптимизацию пространственной протяженности связей.

Геометрический принцип в RGM

При создании связи минимизируется либо ее протяженность $d_S(n_i, n_j)$, либо соотношение эффекта повышения надежности к издержкам**:

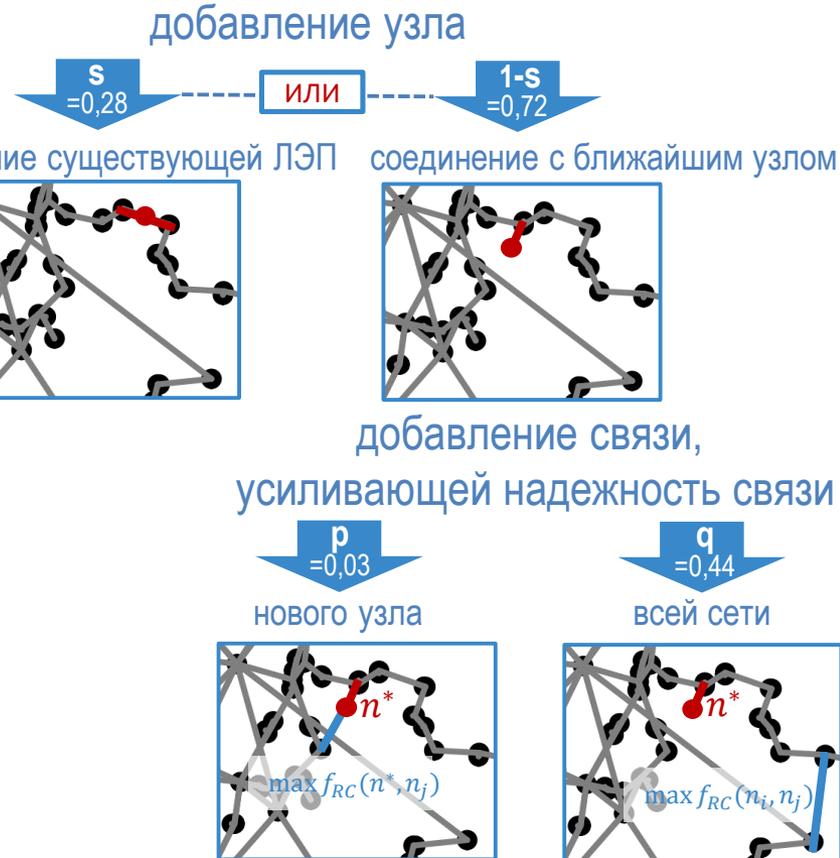
$$f_{RC}(n_i, n_j) = \frac{(d_G(n_i, n_j) + 1)^r}{d_S(n_i, n_j)},$$

d_G – расстояние между узлами в графе.

Исторический принцип в RGM

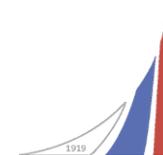
- Как и в модели растущей случайной сети, формирование сети происходит в **две фазы**:
1. создание небольшого связного ядра сети – минимальное остовое дерево усиливается связями с $\max f_{RC}(n_i, n_j)$.
 2. рост сети за счет пошагового добавления узлов и связей (реализация исторического принципа формирования сети).

Правила пошагового роста сети***



*Schultz P., Heitzig J., Kurths J. A Random Growth Model for Power Grids and Other Spatially Embedded Infrastructure Networks // Eur. Phys. J. – 2014

** Кроме случая разбиения ЛЭП при вставке нового узла *** Используются во 2й фазе формирования сети



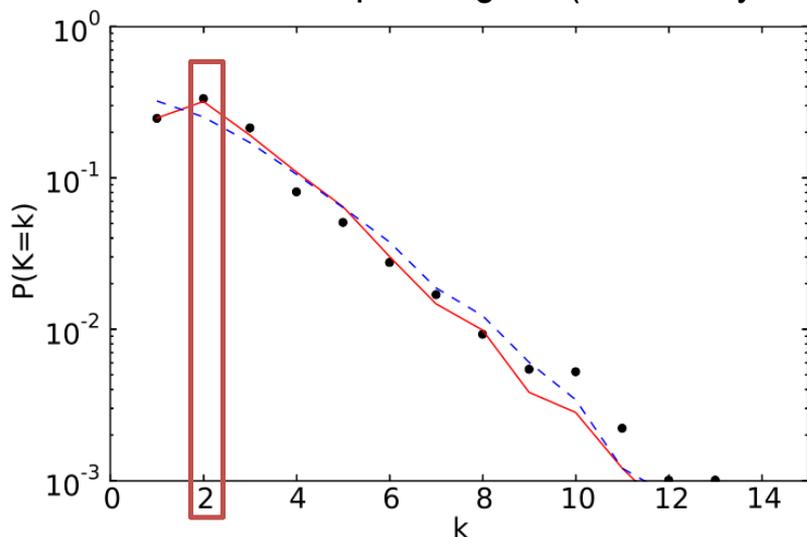
Высокая точность RGM основана на создании множества транзитных узлов за счет разбиения ЛЭП, но на практике большинство транзитных узлов появляются в рамках реализации проектов по строительству длинных цепочек транзитных узлов

Создание транзитных узлов за счет:

Разбиения ЛЭП на 2 участка новой подстанцией

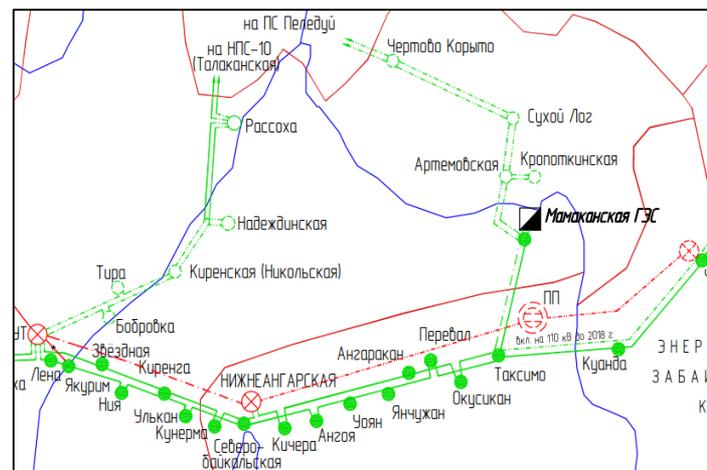
Проектов по созданию цепочек узлов

Распределение степеней узлов для Western US power grid* (6,6 тыс. узлов)

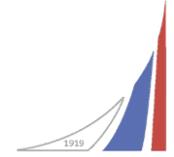


- эмпирическое распределение
- RGM с вероятностью разбиения ЛЭП 0%
- RGM с вероятностью разбиения ЛЭП 28%

Примеры проектов из схемы и программы развития ЕНЭС

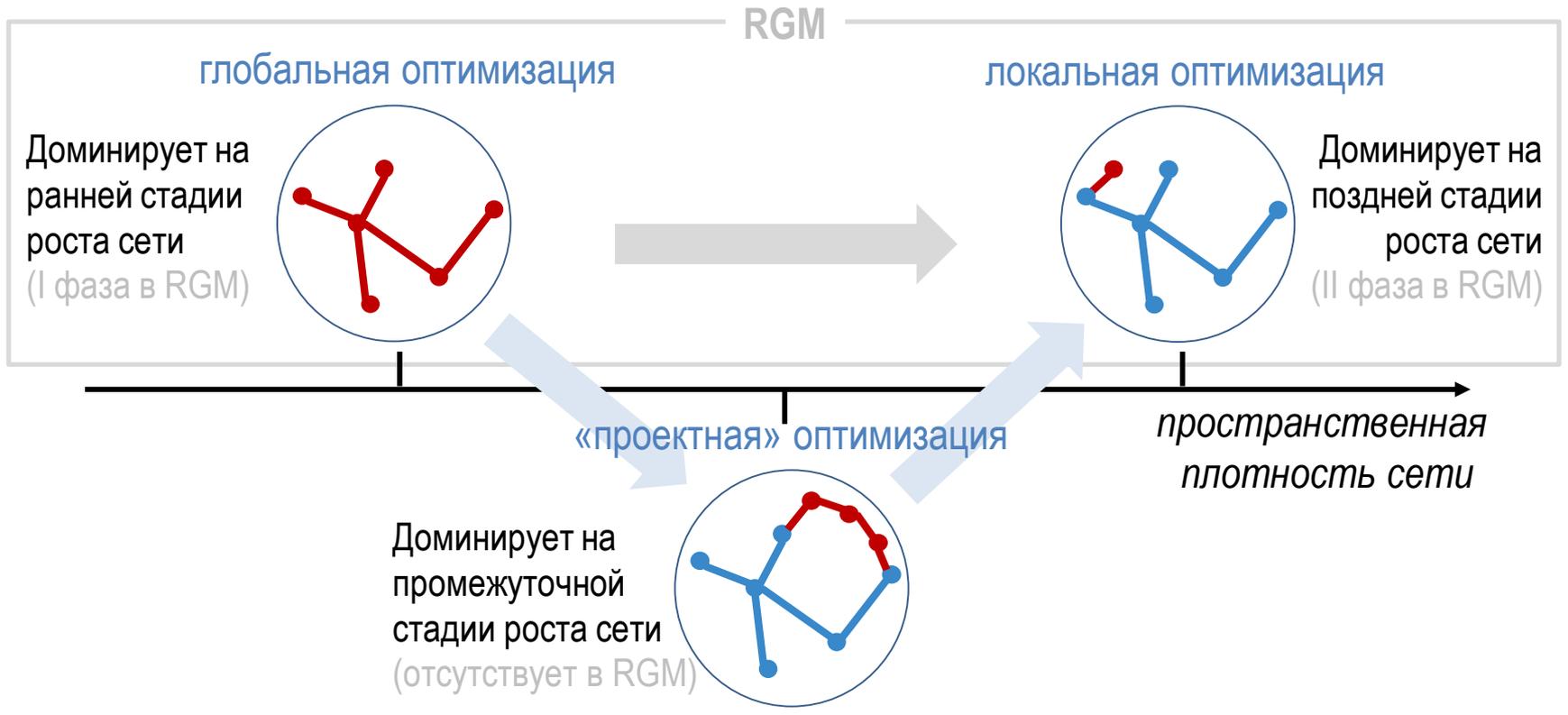


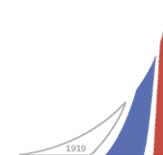
*Schultz P., Heitzig J., Kurths J. A Random Growth Model for Power Grids and Other Spatially Embedded Infrastructure Networks // Eur. Phys. J. – 2014



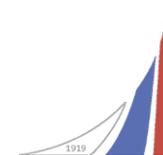
Проведенный анализ показал, что наиболее перспективным направлением разработки модели роста сети является развитие алгоритма RGM за счет добавления механизмов роста сети, промежуточных между глобальной и локальной оптимизацией, способных корректно отразить реализацию целенаправленных проектов развития фрагментов сети

ПРЕДЛАГАЕМАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ МАГИСТРАЛЬНЫХ Э/С





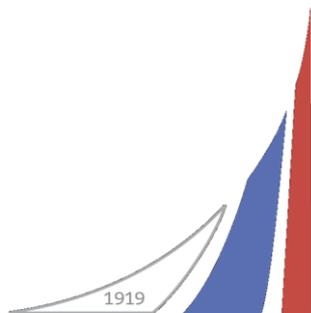
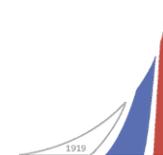
1. Создание модели роста сети ЕНЭС (и других инфраструктурных сетей) имеет высокую практическую значимость, так как может качественно улучшить процесс анализа топологии сетей и позволит использовать новые техники долгосрочного прогнозирования.
2. Получившее распространение использование регрессионного анализа для анализа распределения степеней узлов магистральных электросетей некорректно и приводит к необоснованным выводам относительно модели роста рассматриваемых сетей.
3. Ни одна из широко известных универсальных моделей генерации сетей не является вполне адекватной для описания процесса роста сети ЕНЭС и других магистральных электросетей национального уровня.
4. Для создания ad-hoc модели роста сети, предлагается использовать геометрический и исторический принцип роста сети, позволяющие отразить ключевые процессы ее развития.
5. При создании модели необходимо учесть, что в магистральных электросетях особую роль играют транзитные узлы, за счет которых формируется большое количество длинных цепочек.
6. Алгоритм RGM является подходящим прообразом искомой модели построения сети за исключением специфики работы процесса построения цепочек узлов.
7. Новая ad-hoc модель на базе алгоритма RGM должна отражать фазу «проектной» оптимизации («мезо-оптимизации») процесса роста сети на промежуточной стадии ее развития.



Презентации с выступлений на различных конференциях доступны по адресу:

<https://www.slideshare.net/ssuserc0b06b/>

1. Макрушин С.В. Анализ структуры магистральных электросетей России: оценка применимости модели тесного мира // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2017. – Вып. 65. – С. 87-117. URL: http://ubs.mtas.ru/archive/search_results_new.php?publication_id=21547
2. Макрушин С.В. Анализ топологической структуры магистральных электросетей: поиск новых моделей // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016), 03-05 окт. 2016 г.: Материалы Девятой международной конференции: в 2-х томах. / Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна в 2 т. Т. 1: Изд. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва), 2016, с. 31-33
3. Макрушин С.В. Поиск модели развития топологической структуры магистральных электросетей на основе анализа ЕНЭС // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2016): Труды Девятой международной конференции. 2016 Издательство: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (Москва) 2016, с. 320-328
4. Макрушин С.В. Применение теории сложных сетей для анализа инфраструктурных сетей на примере магистральных электросетей России // Системный анализ в экономике – 2016: сборник трудов IV Международной научно-практической конференции–биеннале (9–11 ноября 2016) / под ред. Г.Б. Клейнера, С.Е. Щепетовой. Т.1. – М.: Финансовый университет, 2016, с. 31-33



ФИНАНСОВЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ПРИ ПРАВИТЕЛЬСТВЕ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Спасибо за внимание!



к.э.н. Сергей Вячеславович Макрушин

SVMakrushin@fa.ru

6 июня 2017 г.