

УДК 911.375(73)

## МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВЯЗЕЙ В СЕТЯХ ГОРОДОВ: РАССТОЯНИЕ, ГРАВИТАЦИЯ, РАДИАЦИЯ (НА ПРИМЕРЕ США)

© 2025 г. Р. А. Дохов<sup>1, 2, \*</sup>, М. А. Топников<sup>2</sup>, А. С. Волошок<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра социально-экономической географии зарубежных стран географического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Москва, Россия

\*e-mail: dokhov@geogr.msu.ru

Поступила в редакцию 14.05.2025 г.

После доработки 23.05.2025 г.

Принята к публикации 26.08.2025 г.

Сетевая революция вдохнула новую жизнь в исследования узловых пространственных структур. Если данные о самих центрах и их характеристиках чаще всего доступны, то данные о связях по-прежнему относительно редки, в особенности при необходимости рассмотрения динамики сети за длительное время. Это делает актуальным рассмотрение различных подходов к моделированию связей между точками с известными атрибутами. Такие подходы можно сгруппировать в три направления: на основе ближайшего соседства, гравитационные и радиационные модели. Первые два получили довольно широкое распространение в общественной географии, пространственной экономике и региональных исследованиях, тогда как радиационные модели предложены чуть более десятилетия назад и остаются малоизвестными. Интенсивность связей в сетях городов понимается нами как потенциальный объем многообразных отношений между ними. На материалах городов США под данным 2010 г. построено три варианта сетей. Показаны географические и структурные различия, проведены количественные сравнения. Метод ближайших соседей позволяет легко выделить основные линии раздела в сети городов и показать главные урбанизационные градиенты, но не позволяет установить силу связей и упускает их множественность. Гравитационная модель зависит от калибровки параметра трения пространства и приоритизирует связи между сближенными крупными городами, а также восходящие связи между средними городами и их ближайшим крупным соседом, подчеркивая иерархичность городских сетей. Радиационная модель дает больший вес связям между сближенными городами сходной людности и показывает меньший диапазон силы связей, подчеркивая плоский характер онтологии сети. Реальные взаимодействия между городами могут приближаться к разным теоретическим состояниям и совместно формировать интегральную конфигурацию связей в сети.

*Ключевые слова:* урбанистика, США, городские системы, сетевые модели, метод Эллиота

DOI: 10.7868/S2658697525050017

### ВВЕДЕНИЕ

Происходящая в последние два десятилетия сетевая революция придала сильнейший новый импульс изучению разнообразных географических сетей (Блануца, 2012; Ханна, 2019). Распространение получили многообразные данные о потоках — маятниковых и долговременных мигрантов, товаров, пассажиров, звонков в сетях мобильных операторов, добавленной стоимости и мн. др. — позволившие географам

с погрузиться в расчеты различных метрик сетевого анализа. Вместе с тем остается актуальной задача восстановления сети из набора точек с приданными им весами, особенно в условиях отсутствия данных о потоках необходимой пространственной детальности или временной глубины. Часто такая потребность возникает при анализе пространственной динамики сетей, когда близкие к современности периоды обеспечены данными, а удаленные во времени лишены таковых. За последние годы класси-

ческие методы моделирования связей между точками получили новое развитие, а также были разработаны новые подходы, преодолевающие существовавшие ранее ограничения. Настоящая статья посвящена обзору накопленного методического арсенала и сравнению результатов применения различных методов моделирования связей между взвешенными пространственно-закрепленными узлами для последующего анализа географических сетей.

## ОБЗОР ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ СВЯЗЕЙ

### *Связи в сетях городов*

В отличие от подхода, основанного на теории центральных мест, сетевые теории городской самоорганизации предполагают большую значимость связей между городами, чем между городом и его хинтерландом (Camagni and Salone, 1993). Современная теория городских сетей предполагает наличие между объединенными в сеть пунктами многообразных связей, чьи конфигурации могут весьма радикально различаться между собой [см., например, (Lee and Joo, 2025; Wen et al., 2025)]. Моделирование способно показать один или несколько вариантов таких конфигураций, из которых, обычно при помощи калибровочного набора данных, выбирается адекватная той частной сети, которую требуется воспроизвести. Реальные связи в сети городов формируют множество одновременно существующих конфигураций (Derruder, 2021), при этом на более мелких масштабах значимость приобретают менее интенсивные типы связей (Blumenfeld-Lieberthal and Portugali, 2010).

Другой подход предполагает построение общей сети условных — наиболее вероятных — связей между городами. В этом случае уместно говорить о потенциале связи по аналогии с потенциалом поля (Глезер, 1983; Полян, 1976), который может быть реализован в виде потоков при существовании условий для возникновения реального взаимодействия. М. Бэтти (Batty, 2013) предлагает понимать сети как контейнеры, чья емкость ограничивает потоки информации и энергии. Потоки куда больше связаны с протекающими в узлах-местах процессами и определяют их краткосрочную функциональную динамику. Сети же могут быть проявлены в материальном мире, но чаще скрыты в кибер- и информационном пространстве. Географический анализ сетей (несводимый к просто анализу сетей в пространстве) предполагает, что они расположены (закреплены на территории хотя бы в части компонентов) и развиваются неравномерно в пространстве и на разных масштабах,

их конфигурации могут быть сущностно интерпретированы относительно собственной логики и территориального контекста и отражают отношения власти (Uitermark and Van Meeteren, 2021). Сеть городов, таким образом, становится инструментом снижения неопределенности распределения свойств среды по территории, за счет использования удаленных ресурсов и распространения инноваций через сетевые взаимодействия между все более отдаленными городами (Pumain and Reuillon, 2017).

Географический подход к сетям можно разделить на две ветви:

- классическая [“пространственный фетишизм” (Anderson, 1985)], развивающаяся с 1960-х годов, рассматривала сети как реально существующие объекты (дороги, реки, города), которые можно концептуализировать через теорию графов (Хаггет, Чорли, 1971), их композиция понималась как результат действия объективных сил;
- новая (Uitermark and Van Meeteren, 2021), формулируемая после и под влиянием сетевого поворота в социальных науках, в которой сеть — результат производства пространства отношений между объектами, укорененный в (не только сетевом) контексте. Композиция тогда не только результат объективных социально-экономических отношений, но скорее нестабильный результат отношений власти.

В настоящей работе мы понимаем интенсивность связей в сетях городов сети городов как потенциальные объемы многообразных потоков между ними.

### *Ближайшие соседи*

Моделирование связей между населенными пунктами путем отнесения пункта к ближайшему по евклидовому расстоянию более крупному соседу в отечественной традиции получило название “метод Эллиота” (Попов, 2017; Смирнягин, 2011) по фамилии американского автора ряда статей на эту тему (Elliott, 1981, 1982, 1983, 1984a, 1984b, 1985, 1986). Продолжателями этого направления можно считать набравшие популярность в силу простоты реализации в ГИС разбиения территории с использованием полигонов Вороного (Okabe et al., 2008; Voronoi, 1908). В этом случае напрямую моделирования сети не происходит, однако предполагается включение в “зону влияния” более крупного узла всего, что попадает внутрь полигона, построенного по принципу наименьшего расстояния до ближайшего узла.

Получаемые таким образом сети имеют древовидную структуру: узел меньшего размера связывается только с одним более крупным

узлом. Исключение составляют сети, моделируемые с привлечением дополнительных данных о наборе связей. К таким относятся создаваемые на основе подхода с построением сети по уточненным расстояниям, например, вычисленным на основе дорожной сети (Шелудков, Орлов, 2019).

*Гравитационная модель*

Основанная на аналогии с ньютоновским принципом взаимодействия между телами гравитационная формула была предложена У. Рейли (Reilly, 1931). В настоящее время гравитационное взаимодействие описывается формулой (1) с двумя параметрами (Wilson and Senior, 1974):

$$T_{ij} = \frac{m_i^\alpha n_j^\beta}{f(r_{ij})}, \tag{1}$$

где  $m, n$  — людность населенных пунктов,  $r$  — расстояние между ними.

Возникновение и сила связи между населенными пунктами описывается уравнением (2):

$$I_{ij} = kP_i f(d_{ij}), \tag{2}$$

где  $I_{ij}$  — влияние  $i$  на  $j$ ,  $k$  — корретирующий параметр,  $P_i$  — население  $i$ , функция  $f(d_{ij})$  описывает форму кривой, характеризующей убывание потенциала влияния с расстоянием  $d$ .

Для описания убывания потенциала влияния с расстоянием обычно используют экспоненциальную функцию (3), поскольку обыкновенно привлекательность центра чрезвычайно высока в непосредственной близости от него, а затем быстро убывает с расстоянием, хотя скорость такого убывания снижается с прогрессом транспортных средств:

$$f(d_{ij}) = e^{-\alpha d_{ij}^\beta}, \tag{3}$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры, описывающие влияние пространства ( $\beta$  обычно называют трением пространства). Эти параметры связаны между собой (4) через значение расстояния, покрываемого в среднем за 1 час при нахождении в рассматриваемый период технических средствах:

$$D_p = \sqrt[\beta]{\frac{\ln \ln 2}{\alpha}}, \tag{4}$$

где  $D_p$  — расстояние, на котором влияние точки сокращается наполовину при заданной функции убывания. Параметр  $\beta$  — трение пространства — задается постоянным (и относительно высоким) для всех временных периодов,  $D_p$  получаем из исторических источников (Bretagnolle et al., 2015), а выводится по последней формуле.

Вариациями развития гравитационных моделей стали так называемые модели географических полей [в том числе потенциала поля расселения (Евтеев, 1969; Медведков, 1965; Сеницын, 2021; Lukermann and Porter, 1960)] и главных потенциалов (Смирнягин, 1985; Трейвиш, 1985).

*Радиационная модель*

Новейшие работы в области моделирования связей между населенными пунктами показывают, что точность гравитационного моделирования не всегда достаточна. Выделяют (Simini et al., 2012) ряд недостатков гравитационных моделей: отсутствует аналитический вывод формулы, для калибровки формулы под имеющиеся данные приходится использовать множество поправочных коэффициентов, исходя из базового уравнения.

Для улучшения точности моделирования связей между населенными пунктами, вместо гравитационной предложена радиационная модель (Simini et al., 2012). В ее основе лежит предположение, что при выборе места получения услуги потребитель собирает и анализирует все предложения на рынке, как в своей территориальной единице, так и во всех остальных. Идеологически радиационная модель представляет сведение к частному случаю (Simini et al., 2013) модели промежуточных возможностей (Stouffer, 1940), рассматривавшей объем предложения в промежуточных точках между взаимодействующими, как величину, обратно влияющую на силу взаимодействия. Количество таких предложений в каждой территориальной единице  $n_j$  пропорци-

онально числу жителей в ней  $\frac{n_j}{n_{jobs}}$ , при этом привлекательность каждого из них распределяется случайным образом  $p_z$ . Потребитель выбирает ближайшее предложение, привлекательность которого выше, чем привлекательность лучшего предложения в исходной ячейке. Тогда на конфигурацию потоков между населенными пунктами оказывают влияние три независимые переменные: распределение качества услуг  $p_z$ , плотность предложений  $n_{jobs}$  и общее число мигрантов  $N_c$ , однако показано (Simini et al., 2012, suppl. 2), что объем потока  $T_{ij}$  независим от  $p_z$  и  $n_{jobs}$ , а параметр  $N_c$  не оказывает влияния на конфигурацию потоков. Таким образом, модель свободна от параметров. Тогда,

$$T_{ij} = T_i \frac{m_i n_j}{(m_i + s_{ij})(m_i + n_j + s_{ij})}, \tag{5}$$

где  $T_{ij}$  — поток между точками  $i$  с населением  $m_i$  и  $j$  с населением  $n_j$ , которые расположены на расстоянии  $r_{ij}$ , а  $s_{ij}$  — суммарное население

окружности радиусом  $r_{ij}$  с центром в точке  $i$ .  $T_i \sum_{j \neq i} T_{ij}$  — это общее число всех компьютеров, выходящих из точки  $i$ , которое пропорционально населению  $i$ , так что  $T_i = m_i (N_c / N)$ , где  $N_c$  — число компьютеров в стране, а  $N$  — население страны.

В такой формулировке модель избавляется от основных пороков гравитационной модели (отсутствие аналитического вывода, калибровочные коэффициенты), а в основе моделирования лежит теперь не расстояние между точками, а население окрестности точки начала потока. Главное ограничение радиационной модели (Lenormand, 2012) состоит в переходе между масштабами операционных территориальных единиц, при котором пространственное распределение населения между взаимодействующими точками меняется. Для его преодоления были предложены варианты нормализованной радиационной модели (Masucci et al., 2013) и расширенной радиационной модели (Yang et al., 2014), в которой масштаб и степень неоднородности региона учитывается при помощи коэффициентов, описывающих распределение точек начала (например, мест жительства) и конца (например, мест работы) связей. Используются и другие уточненные варианты радиационной модели: с учетом временных издержек на перемещение (Ren et al., 2014) и уровня занятости (Piovani et al., 2018).

## ДАнные И МЕТОды

### *Использованные данные*

Для сравнения сетей, получаемых различными методами, мы используем информацию о численности населения по всем населенным пунктам США на 2010 г., полученные из работы А. Бретаньоль и соавторов (Bretagnolle et al., 2015). Это гармонизированный набор данных, содержащий информацию о людности и координатах всех населенных пунктов, численностью населения более 10 тыс. чел. В это количество включается не только население формальных поселений в муниципальных границах, а все жители “реальных городов” — функциональных городских ареалов (FUA), в которые включаются все поселения, расположенные в радиусе доступности для маятниковой миграции, этот материал вычислен авторами на основе большого массива исторических данных. Далее мы будем отождествлять FUA и города.

База данных содержит информацию о координатах и населении 909 городов в 2010 г. в виде точек-центроидов для внеметрополитенских городов и полигонов для агломераций.

Полигональные объекты также переводятся в точечные через расчет центроидов. На их основе мы восстанавливаем сеть городов тремя описанными выше методами. Расчеты и анализ проводились в границах 48 смежных штатов, поскольку адекватно включить оставшиеся территории в рассмотрение не позволяют условия территориальной изолированности и наличие (в случае Аляски) значительных населенных пунктов между ними и основной территорией страны.

### *Моделирование сети взаимодействий между точками*

Для установления взаимодействий на основе ближайших соседств методом Эллиота необходимо выбрать два пороговых значения: вес кардинальной точки (вершины, к которой сходятся линии графа ближайших соседств) и соотношение весов вершин, при котором меньшая точка попадает в зону влияния более крупной. Изменение этого отношения позволяет манипулировать чувствительностью “урбанизационного градиента” — того, насколько разница в численности населения определяет перенаправление связи. Оба значения подбираются эмпирически. В нашем случае сети сходятся к городам людностью 10 и 2 млн чел., связь устанавливается между городами, различающимися по населению на 10% [такой же коэффициент использовал Эллиот (Elliott, 1983, 1984b)]. Построение связей реализовано в виде алгоритма в программной среде python. В качестве входных данных программа берет точечный слой пространственных данных с городами и их людностью. Для каждого города из слоя программа вычисляет ближайшего соседа оптимальной людности, к которому тяготеет этот город. Таким образом, на выходе получается линейный слой сетей тяготений городов друг к другу.

Моделирование гравитационных связей проводилось в python с использованием коэффициента трения пространства равного 2. Это допущение представляется корректным, поскольку динамика трения пространства уже частично учтена авторами базы данных при делимитации FUA. Связи рассчитываются с использованием эвклидова расстояния по парной матрице всех точек. Полученный в результате граф рассматривается как ориентированный с направлением к более крупной точке.

Моделирование радиационных взаимодействий проводилось также в программной среде python для всех пар точек. Значимое отличие от результата гравитационного взаимодействия заключается в том, что результатом становится несимметричное отношение между двумя точками, т.е. связь А к Б не равна Б к А, что

обусловлено различием набора конкурирующих возможностей между окрестностями этих точек. Итоговый граф имеет по две ориентированные в разные стороны связи между каждой парой точек.

Полученные сети картографированы в QGIS, на картах для повышения читаемости отображены только наиболее интенсивные связи. Показатели интенсивности связей по результатам моделирования исчисляются в условных единицах, поэтому для удобства восприятия абсолютные значения были логарифмированы, в легендах представлен десятичный логарифм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Построение сети методом ближайших соседей позволяет быстро обнаружить наиболее крупные водоразделы в системе городов страны (рис. 1а). В США этот разрыв предсказуемо пролегает по Великим равнинам и “Пустой четверти” на севере Скалистых гор. Большая часть собственно равнин (и все сельскохозяйственные пояса) при этом отходит к Востоку с одним значимым исключением: западный Техас через посредство Эль-Пасо, Альбукерке, Денвера и Финикса отходит к Лос-Анджелесу. Чикаго выполняет важнейшую посредническую роль, передавая влияние Нью-Йорка всему Среднему Западу — через Миннеаполис, Милуоки, Детройт и Сент-Луис и Югу — Далласу, Хьюстону и Атланте. Нью-Йорк помимо Чикаго связан напрямую из крупных городов лишь с Бостоном, Филадельфией и Вашингтоном. Лос-Анджелес имеет три канала влияния: через Сан-Франциско далее вдоль побережья на север, через Сан-Бернардино на Горный Запад и через Финикс на Юго-Запад и Скалистые горы.

Метод Эллиота позволяет, изменяя людность кардинального места, получать более дробные разбиения сети поселений на участки, по сути, задавая количество кластеров, на которые делится сеть. Пример более детальной сегментации сети на 30 участков при людности кардинального места более 2 млн чел. (рис. 1б) демонстрирует как сильные, так и слабые стороны этого варианта метода ближайших соседей.

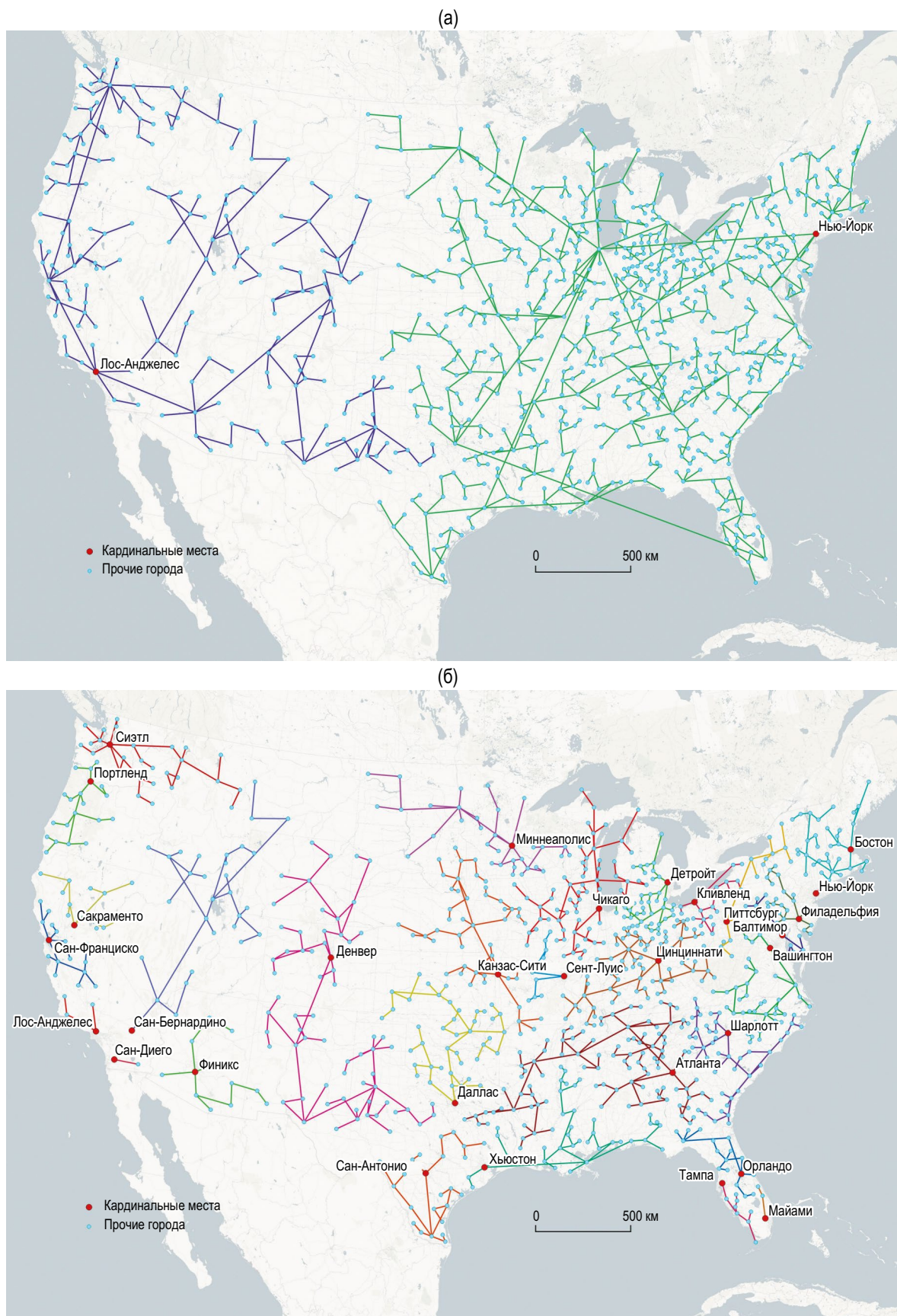
Картина пестрая, включающая весьма любопытные очертания. Так, просматриваются сети, наследующие течению крупных рек: сходящиеся к Сиэтлу по рр. Колумбия и Снейк, к Цинциннати по р. Огайо. Отчетливо проступают главные горные препятствия (Аппалачи, Озарки, Скалистые и Каскадные горы), разделяющие полученные участки. Интересно близкое сходство получившихся сетей Юга страны с его классическим районированием (Смирнягин,

1989): Атланта возглавляет сеть Глубокого Юга (правда присоединившего к себе лишённые крупных городов Делту и Пайни-Вудс), Хьюстон — совокупность Галфов (Каджунского и Техасского), Шарлотт и Вашингтон поделили Старый Юг на две части, Цинциннати объединил Пограничный Юг и Огайские равнины. Центрированная на Бостон Новая Англия также повторяет свои районные очертания, а Верхний Нью-Йорк попадает в сеть Питтсбурга.

Крупнейшие города страны часто имеют очень небольшие сходящиеся к ним сегменты сети: к Нью-Йорку присоединяется лишь Бриджпорт, к Сан-Диего — только Эль-Сентро, к Майами — два города, к Лос-Анджелесу — всего четыре. С одной стороны, такое часто бывает и в реальности, когда зона влияния крупнейшего города ограничена сближенными с ним другими крупными городами, которые как бы обрезают конус его влияния. С другой — каскадная модель присоединения более мелких городов не позволяет им соединиться с крупнейшим, навязывая более близких “посредников”, что приводит к описанным выше парадоксам.

Специфика метода скорее позволяет увидеть тень крупных городов, чем более связанные участки. Это проявляется в расходящихся в разные стороны от скоплений крупных городов сегментах сети: например, от Лос-Анджелеса, Сан-Диего и Сан-Бернардино в Южной Калифорнии. Крупнейшие города Горного Запада — Лас-Вегас и Солт-Лейк-Сити — людностью меньше выбранного порога в 2 млн чел. и не формируют отдельных сегментов. В результате сходящаяся к Сан-Бернардино сеть протягивается по горной части страны на север вплоть до Грейт-Фолс в Монтане. Аналогично расходятся в разные стороны сети, сходящиеся к крупнейшим городам Техаса: Далласу, Сан-Антонио и Хьюстону, причем последний возглавляет сеть поселений вдоль всего Мексиканского залива и по нижнему течению р. Миссисипи.

Гравитационные взаимодействия (рис. 2) показывают выраженный раскол на западную и восточную части страны при почти полной пустоте Горного Запада и Великих равнин. Два этих участка сети объединены только связями Далласа и Хьюстона с Лос-Анджелесом, Далласа с Финиксом и Далласа с Денвером (и через него вновь с Лос-Анджелесом), а также трансконтинентальными связями крупнейших городов — Нью-Йорка, Чикаго и Лос-Анджелеса. На тихоокеанском побережье два крупнейших участка сети связаны только через свои главные центры: Портленд и Сиэтл в Каскадии и Сан-Франциско и Лос-Анджелес в Калифорнии.



**Рис. 1.** Городская сеть США по методу Эллиота с кардинальными местами людностью более 10 млн чел. (а) и более 2 млн чел. (б).  
Составлено авторами.

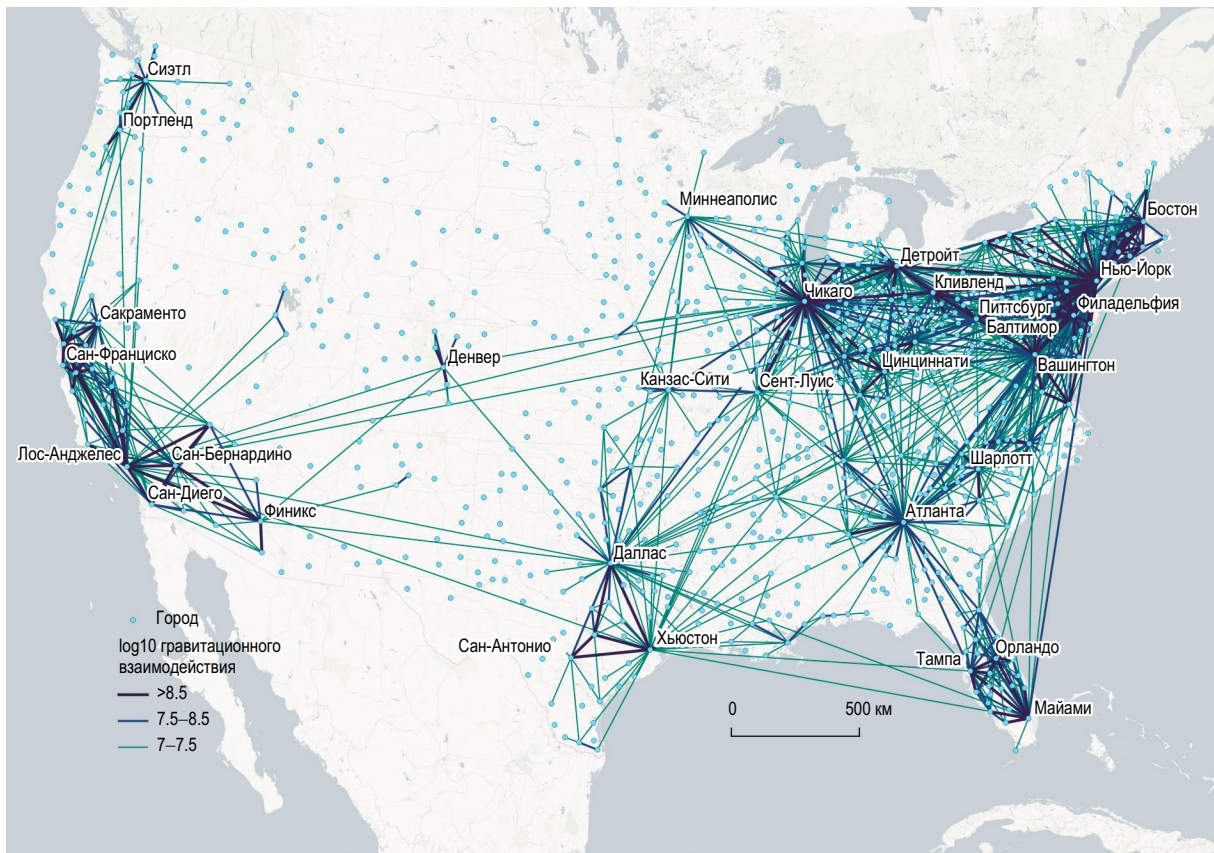


Рис. 2. Гравитационная модель городской сети США в 2010 г. Показаны только наиболее интенсивные связи. Составлено авторами.

Наиболее сильные взаимодействия в смоделированной гравитационным образом сети объединяют города в группы, похожие на мегарегионы США (Смирнягин, 2011; Florida et al., 2008): Северная и Южная Калифорнии и Финикс (три разных мегарегиона с выбросом в сторону локального связанного участка около Солт-Лейк-Сити), Техасский треугольник, Каскадия (от Сиэтла до Портленда), Передовой хребет (Денвер и Боулдер, но без связи с Альбукерке), Великие озера (от Сент-Луиса и Чикаго до Кливленда и Цинциннати), Мегалополис северо-восточного побережья, Пидмонт (от Бирмингема и Атланты до Шарлотта и Роли), Флорида. Отсутствуют сопоставимые связи по побережью Мексиканского залива (локальная ось связанности проходит лишь от Батон-Ружа через Новый Орлеан до Пенсаколы). Слабы связи между Старым и Новым Югом (Смирнягин, 1989) (только через крупнейшие Атланту, Мемфис и Нэшвилл с одной стороны и Даллас и Хьюстон с другой). Наиболее сложна и связана сеть между Великими Озерами и северо-восточным побережьем, в которой помимо очевидных крупнейших центров выделяются значительные окраинные узлы: Цинциннати на юге, притягивающий к себе Луисвилл и другие города Кентукки, а также Миннеаполис, создающий вокруг себя локаль-

ный участок тяготения в Лесном Приозерье, Канзас-Сити и Сент-Луис, распространяющие влияние Приозерья глубоко внутрь слабосвязанных сельскохозяйственных равнин. Техасский треугольник образует побочный цикл более на севере (с Талсой и Оклахома-Сити).

Наиболее сильные связи предсказуемо приурочены к крупнейшим узлам сети (табл. 1). Гравитационная модель (при небесспорном, но распространенном значении параметра трения пространства, равном 2) показывает сопоставимость интенсивности связей между относительно сближенными крупнейшими городами (Нью-Йорком и Филадельфией, Бостоном, Вашингтоном, Балтимором или Вашингтоном и Балтимором, Лос-Анджелесом и Сан-Диего, Чикаго и Милуоки) и связей крупнейшего города и близкого к нему менее крупного (Нью-Йорка и Бриджпорта, Нью-Хейвена, Хартфорда, Аллентауна, Трентона, Лос-Анджелеса и Окснарда, Детройта и Флинта, Бостона и Вустера). При этом сильно проигрывают в интенсивности связи между относительно отдаленными крупнейшими городами. Так, интенсивность связи между расположенным на восточном побережье Нью-Йорком и приозерным Чикаго, первым и вторым городами страны по численности населения, лишь 2.5% от максимального значения

**Таблица 1.** Наиболее тесно связанные пары городов (гравитационная модель)

№	Город 1	Город 2	Интенсивность, %
1	Нью-Йорк	Бриджпорт	100.00
2	Нью-Йорк	Филадельфия	81.31
3	Нью-Йорк	Нью-Хейвен	32.11
4	Вашингтон	Балтимор	31.54
5	Лос-Анджелес	Сан-Бернардино	27.35
6	Лос-Анджелес	Окснард	24.13
7	Лос-Анджелес	Сан-Диего	23.18
8	Нью-Йорк	Хартфорд	21.38
9	Филадельфия	Балтимор	19.67
10	Нью-Йорк	Аллентаун	18.82
11	Нью-Йорк	Бостон	18.59
12	Нью-Йорк	Трентон	14.30
13	Нью-Йорк	Вашингтон	14.19
14	Бостон	Провиденс	13.76
15	Филадельфия	Вашингтон	13.09
16	Чикаго	Милуоки	12.10
17	Нью-Йорк	Балтимор	12.10
18	Детройт	Флинт	11.94
19	Бостон	Вустер	11.83
20	Нью-Йорк	Провиденс	11.29

*Примечание:* связи нормированы, в условных единицах. Составлено авторами.

(т.е. в 5.5 раз слабее, чем между Нью-Йорком и Вашингтоном), а связь Нью-Йорка и тихоокеанского Лос-Анджелеса — 0.3% (в 47 раз слабее, чем Нью-Йорка и Вашингтона). Это значительно слабее, к примеру, их транспортных пассажирских связей: так, в 2010 г. суммарный поток из аэропортов из Нью-Йорка<sup>1</sup> в Лос-Анджелес составил 6.02% от всего потока из Нью-Йорка, в Чикаго — 5.61% (это первый и третий по объему пассажирских авиаперевозок маршруты в стране)<sup>2</sup>. Прямое сопоставление пассажиропотока (тем более только авиационного) и интегрального взаимодействия городов

<sup>1</sup> Аэропорты им. Джона Кеннеди, Ньюарк Либерти, Ла-Гуардия, Стюарт.

<sup>2</sup> 2010 Annual Traffic Report. The Port Authority of New York and New Jersey, 2011.

некорректно, однако дает основания полагать, что гравитационная модель существенно недооценивает дальние взаимодействия крупнейших узлов сети.

Радиационные взаимодействия показывают более сложную и менее очевидную картину (рис. 3). Основанная на идее конкурирующих возможностей модель показывает значительно более низкую среднюю интенсивность связей, однако гораздо более равномерное их распределение. Помимо низкоинтенсивных трансконтинентальных связей крупнейших городов радиационное моделирование показывает множественные локальные короткие связи, пронизывающие пространство Великих равнин и обнажающее более детальную структуру взаимодействий городов. Это приводит к появлению мощных узлов-посредников — таких как Денвер, Солт-Лейк-Сити, Атланта, Миннеаполис, Сент-Луис, связанных со множеством точек средне- и низкоинтенсивными связями.

Улучшается и соответствие авиационным пассажирским связям между крупнейшими удаленными друг от друга городами: радиационная связь между Нью-Йорком и Чикаго — 5.98% от максимального значения, или в 3 раза меньше, чем между Нью-Йорком и Вашингтоном (в 2 раза точнее, чем гравитационным методом), Нью-Йорком и Чикаго — 1.55% (в 12 раз слабее связи с Вашингтоном, в 4 раза точнее). Тем самым, расхождение в соответствии потокам авиапассажиров между моделями увеличивается в пользу радиационной с увеличением расстояния.

Как и при применении гравитационной модели, выделяются связи внутри мегарегионов, но их пространственная структура более разнообразна и менее очевидна. Наиболее сильными становятся связи от средних к крупнейшим городам, когда такой крупнейший город единственный в непосредственной близости, а значит, может быть единственной точкой удовлетворения спроса значительного количества жителей (табл. 2). Города Техасского треугольника связаны не только между собой, но и с приграничными Корпус-Кристи, Браунсвиллом и Макаленом, а также Лафайетом в дельте Миссисипи (при этом более самодостаточный Новый Орлеан не имеет таких сильных связей).

Модель показывает самодостаточность связок крупных городов, которым не требуется сильного взаимодействия с крупнейшими. Наиболее яркий случай — связи между городами Новой Англии (Бостоном, Вустером, Спрингфилдом, Провиденсом, Хартфордом, Нью-Хейвеном и даже Бриджпортом) значительно сильнее, чем между ними и Нью-Йорком (сопоставима толь-

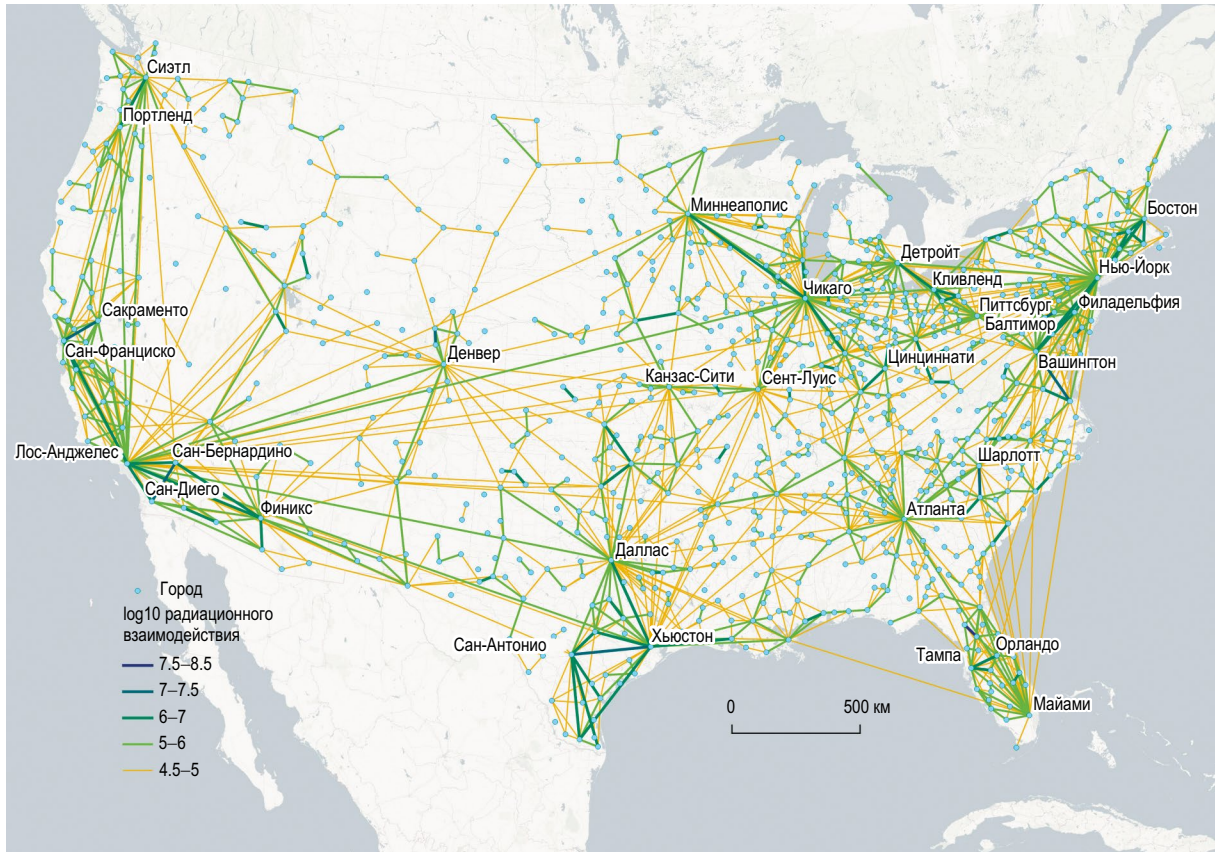


Рис. 3. Радиационная модель городской сети США в 2010 г. Показаны только наиболее интенсивные связи. Составлено авторами.

ко связь из Бостона в Нью-Йорк). Аналогичные случаи весьма распространены:

- Буффало и Рочестер — Нью-Йорк;
- Кливленд, Акрон и Янгстаун тяготеют больше к Детроиту, чем к расположенному ближе Питтсбургу;
- Ланкастер и Йорк — Филадельфия;
- Довер и Бриджтон — Филадельфия;
- Шарлотт, Колумбия и Огаста — Атланта;
- Исследовательский треугольник (Дарем, Гринсборо, Уинстон-Сейлем) — Шарлотт (отношение второго порядка);
- Орlando, Тампа и Порт-Сен-Луис — Майами;
- Гейнсвилл и Окала — Орlando<sup>3</sup>;
- Билокси и Мобил — Новый Орлеан;
- Талса, Оклахома-Сити и Уичито — Даллас;
- Джефферсон-Сити и Колумбия (шт. Миссури) — Сент-Луис или Канзас-Сити;
- Боулдер и Форт-Коллинс — Денвер;
- Модесто и Стоктон — Сан-Франциско или Сан-Хосе;
- Кенневик и Якима — Портленд или Сиэтл.

<sup>3</sup> Гейнсвилл и Окала вообще образуют наиболее сильную связь в сети (см. табл. 2).

Такая структура позволяет сделать предположение об иной природе связей, демонстрируемых радиационной моделью. Возможно, менее иерархичный рисунок с приоритетом связей близких и сходных по размеру городов свидетельствует о том, что трактуемая как обмен связь (а почти всякая связь, в конечном счете, ведет к возможности обмена) в этом случае отражает иную природу взаимодействия. Если в иерархизированных системах более крупные узлы становятся для более мелких источниками отсутствующих в них функций (зависимых от масштаба), то в плоских сетях, по-видимому, одинаковые узлы получают доступ к сходным функциям. В таком случае, вероятно, выгода от обмена состоит в повышении разнообразия предложения функции одного вида для потребителей в обоих связанных городах. Это возможно при росте значения тех типов связей, для которых значимо такое разнообразие, в первую очередь — в постиндустриальной экономике, где потребление сложных услуг во многом индивидуально.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты применения трех способов моделирования связей к сети городов США позволяют предположить, что с их помощью

**Таблица 2.** Наиболее тесно связанные пары городов (радиационная модель)

№	Начало	Конец	Интенсивность, %
1	Гейнсвилл	Окала	522
2	Колумбия	Шарлотт	100.00
3	Форт-Коллинс	Боулдер	66.27
4	Сан-Антонио	Хьюстон	59.55
5	Бриджпорт	Нью-Хейвен	55.31
6	Сакраменто	Сан-Франциско	50.55
7	Сан-Бернардино	Сан-Диего	44.01
8	Йорк	Ланкастер	41.13
9	Норфолк	Вашингтон	39.83
10	Остин	Сан-Антонио	37.40
11	Билокси	Мобил	37.35
12	Лонгвью	Тайлер	36.72
13	Мичиган-Сити	Бентон-Харбор	27.41
14	Сан-Антонио	Остин	25.33
15	Мак-Аллен	Сан-Антонио	24.64
16	Брайан	Уэйко	19.94
17	Нью-Йорк	Филадельфия	19.39
18	Финикс	Сан-Бернардино	19.14
19	Дарем	Гринсборо	18.30
20	Довер	Бриджтон	17.89

*Примечание:* связи нормированы, в условных единицах. Базовой для нормирования взята пара Колумбия–Шарлотт, чтобы сильно отличающееся значение связи в первой паре не сглаживало дифференциацию получившегося ранжированного списка.

*Составлено* авторами.

выявляются разные типы потоков, существующие одновременно и совместно формирующие сеть. Тогда можно представить полученные варианты сети как теоретически возможные ее конфигурации, возникающие в случае приближения условий функционирования сети, т.е. создания в ней реальных потоков, к описываемым посредством иерархизирующей сетевое пространство гравитации, проводящего четкие линейные границы метода ближайших соседей и создающей плоские взаимосвязи сближенных сходных узлов радиацией.

Возможное объяснение таких условий предлагает аналогия между результатами моделирования связей в сети городов методом ближайших

соседей, гравитационного и радиационного и теориями международной торговли по Смиту [2016 (1776)], Рикардо [2008 (1817)] и Кругману–Фудзите (Fujita et al., 2001) соответственно. Как разные теории международной торговли представляют агентов торговли и саму ее сущность по-разному, так и связи в городской системе могут отвечать разным ее состояниям и отражать разные стороны взаимодействий.

Метод ближайших соседей предполагает абсолютное преимущество ближайшего большего города над меньшим, которое приводит к созданию единственной всеобъемлющей связи.

Гравитационное взаимодействие показывает максимизацию связей между сближенными крупными городами, а также сильные потоки между крупным городом и его средними соседями. Это сходно с представлениями теорий Рикардо и Хекшера–Олина, в которых максимальна торговля между различными по уровню развития странами.

Радиационная модель приоритизирует связи между сближенными сходными по размеру городами, в ходе которой, по-видимому, максимизируется потребление сходных функций в соседнем похожем по численности населения городе. Аналогично новая теория международной торговли акцентирует внимание на росте объемов внутриотраслевой торговли между похожими странами.

Реальные потоки в современной международной торговле конкретным продуктом могут отвечать одному из теоретических представлений, но другой отраслевой или региональный сегмент рынка в то же самое время может быть ближе к иному состоянию. Также и в городской сети реальные взаимодействия между городами через потоки маятниковых мигрантов, туристов, продуктов разной сложности будут приближаться к разным теоретическим состояниям и совместно формировать интегральную конфигурацию связей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Различные методы моделирования связей в сетях городов позволяют приблизиться к разным онтологическим представлениям о сущности городов, объединенных в систему (Веггу, 1964). Метод ближайших соседей отражает идею сплошного урбанизационного градиента, приближая сеть к проекции псевдорельефа численности населения. Гравитационная модель подчеркивает иерархичность отношений узлов, позволяя более отчетливо говорить об уровнях узлов. Радиационная модель приближает сеть к плоской, отражая распространившиеся в последние десятилетия представления о “плоских

онтологиях” (Marston et al., 2005), в которых роль иерархий уменьшается, в них возможны прямые связи между сближенными сущностями любого размера и природы. Такое разнообразие дает новую перспективу на известный спор о пользе растущей интегрированности между сторонниками “плоского” мира равных возможностей универсального доступа к рынку [Фридман, 2009 (2005)] и заостренного мира триумфа небольшого количества ключевых точек (Florida, 2005). Современная городская сеть США, по-видимому, одновременно содержит в себе как конфигурации потоков плоского мира, так и иерархичность заостренного. Город извлекает преимущество — и в процессе соответствующим образом специализируется — из той конфигурации, которая больше ему благоприятствует в текущий момент. Изменение этого отношения, например, когда узловое положение в гравитационной сети становится хуже положения в радиационной, вероятно, должно приводить к постепенной смене специализации города. Рассмотрение динамики значимости городов в различных моделях их сетей — одно из возможных продолжений настоящей работы.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

В статье представлены результаты научно-исследовательской работы, выполненной в рамках государственного задания на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова (№ 121051400060-2 “Теория и практика эволюционного страноведения в условиях глобальных вызовов”).

## FUNDING

The article was prepared within the framework of the state assignment “Theory and Practice of Evolutionary Regional Studies in the Context of Global Challenges.”

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блануца В.И.* Географическое изучение сетевого мира: исходные установки и перспективные направления // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 5–13.
- Глезер О.Б.* Использование потенциала поля городского расселения для анализа урбанизации в сельской местности (на примере Дагестанской АССР) // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1983. № 6. С. 114–126.
- Евтеев О.А.* Карта потенциала поля расселения как особый вид изображения населенности территории // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 1969. № 2. С. 72–76.
- Медведков Ю.В.* Экономгеографическая изученность районов капиталистического мира. М.: ВИНТИ, 1965. Вып. 2. 162 с.
- Полян П.М.* Исследование территориальных структур методом потенциалов (на примере машиностроения зарубежных европейских стран-членов СЭВ) // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1976. № 4. С. 94–101.
- Попов Ф.А.* Размышления о целях и методах изучения зон ментального влияния городов // Городские исследования и практики. 2017. Т. 2. № 2. С. 13–32.
- Рикардо Д.* Начала политической экономии и налогового обложения. Избранное. М.: Эксмо, 2008. 960 с.
- Синицын Н.А.* Районирование российско-белорусского пограничья с использованием метода демографического потенциала // Региональные исследования. 2021. № 2 (72). С. 32–47.
- Смирнягин Л.В.* Разграничение зон влияния городов методом главных потенциалов // Проблемы современной урбанизации. М.: МФГО, 1985. С. 95–105.
- Смирнягин Л.В.* Районы США: портрет современной Америки. М.: Мысль, 1989. 380 с.
- Смирнягин Л.В.* Районирование общества: методика и алгоритмы // Вопросы экономической и политической географии зарубежных стран. М.—Смоленск: Ойкумена, 2011. Т. 19. С. 55–82.
- Смирнягин Л.В.* Мегарегионы как новая форма территориальной организации общества // Вестн. Моск. ун-та. Серия 5. География. 2011. № 1. С. 9–15.
- Смит А.* Исследование о природе и причинах богатства народов. М.: Эксмо, 2016. 1056 с.
- Трейвиш А.И.* Опыт разграничения зон потенциального влияния городов СССР / Проблемы современной урбанизации. М.: МФГО, 1985. С. 105–113.
- Фридман Т.* Плоский мир. Краткая история XXI века. М.: АСТ, 2006. 607 с.
- Хаггетт П., Чорли Р.* Модели, парадигмы и новая география // Модели в географии. М.: Прогресс, 1971. С. 7–28.
- Ханна П.* Коннектография: Будущее глобальной цивилизации. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2019. 432 с.
- Шелудков А.В., Орлов М.А.* Топология сети населенных пунктов как фактор динамики сельского расселения (на примере Тюменской области) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2019. № 4. С. 46–62.
- Anderson J.* Ideology in geography: an introduction // Antipode. 1985. Vol. 17. № 2–3. P. 28–34.
- Berry B.J.L.* Cities as systems within systems of cities // Papers in regional science. 1964. Vol. 13. № 1. P. 147–163.
- Batty M.* The new science of cities. MIT Press, 2013. 520 p.

- Blumenfeld-Lieberthal E., Portugali J.* Network cities: A complexity-network approach to urban dynamics and development // *Geospatial analysis and modelling of urban structure and dynamics*. Springer Netherlands, 2010. P. 77–90.
- Bretagnolle A., Delisle F., Mathian H., Vatin G.* Urbanization of the United States over two centuries: an approach based on a long-term database (1790–2010) // *Int. J. Geogr. Information Sci.* 2015. Vol. 29. № 5. P. 850–867.
- Camagni R.P., Salone C.* Network urban structures in northern Italy: elements for a theoretical framework // *Urban Studies*. 1993. Vol. 30. № 6. P. 1053–1064.
- Derudder B.* Network analysis of ‘urban systems’: potential, challenges, and pitfalls // *Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie*. 2021. Vol. 112. № 4. P. 404–420.
- Elliott H.M.* Macrocalfornia and the Urban Gradient // *The California Geographer*. 1981. Vol. 21. P. 1–17.
- Elliott H.M.* The Pacific Coast Nearest Larger Neighbor Gradient // *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*. 1982. Vol. 44. P. 29–45.
- Elliott H.M.* Surrounding larger neighbors and the Atlantic coast cardinal neighbor gradient // *Econ. Geogr.* 1983. Vol. 59. № 4. P. 426–444.
- Elliott H.M.* Cardinal place geometry in the American South // *Southeastern Geographer*. 1984a. Vol. 24. № 2. P. 65–77.
- Elliott H.M.* Cardinal Places and the Urban Gradient // *Urban Geography*. 1984b. Vol. 5. № 3. P. 223–239.
- Elliott H.M.* Cardinal place geometry // *Geographical Analysis*. 1985. Vol. 17. № 1. P. 16–35.
- Elliott H.M.* Changing Spatial Structure in the Rocky Mountain Regional System // *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers*. 1986. Vol. 48. P. 149–167.
- Florida R.* The world is spiky // *The Atlantic Monthly*. 2005. Vol. 296 (3). P. 48–51.
- Florida R., Gulden T., Mellander C.* The rise of the mega-region // *Cambridge J. of Regions, Economy and Society*. 2008. Vol. 1. № 3. P. 459–476.
- Fujita M., Krugman P.R., Venables A.* The spatial economy: Cities, regions, and international trade. MIT press, 2001. 367 p.
- Lee S., Joo H.* Passenger and freight travel patterns: A cluster analysis based on urban networks // *PLoS ONE*. 2025. Vol. 20. № 3. P. e0318084.
- Lenormand M., Huet S., Gargiulo F., Deffuant G.* A universal model of commuting networks // *PLoS ONE*. 2012. Vol. 7. № 10. P. e45985.
- Lukermann F., Porter P.W.* Gravity and potential models in economic geography // *Annals of the Association of American Geographers*. 1960. Vol. 50. № 4. P. 493–504.
- Masucci A.P., Serras J., Johansson A., Batty M.* Gravity versus radiation models: On the importance of scale and heterogeneity in commuting flows // *Physical Review E*. 2013. Vol. 88. № 2. P. 022812.
- Marston S.A., Jones III J.P., Woodward K.* Human geography without scale // *Transactions of the Institute of British Geographers*. 2005. Vol. 30. № 4. P. 416–432.
- Okabe A., Satoh T., Furuta T., Suzuki A., Okano K.* Generalized network Voronoi diagrams: Concepts, computational methods, and applications // *Int. J. Geogr. Information Sci.* 2008. Vol. 22. № 9. P. 965–994.
- Piovani D., Arcaute E., Uchoa G., Wilson A., Batty M.* Measuring accessibility using gravity and radiation models // *Royal Society Open Science*. 2018. Vol. 5. № 9. P. 171668.
- Pumain D., Reuillon R.* Urban dynamics and simulation models. Cham: Springer, 2017. 123 p.
- Reilly W.J.* The law of retail gravitation. NY: Knickerbocker Press, 1931. 75 p.
- Ren Y., Ercsey-Ravasz M., Wang P., González M.C., Toroczkai Z.* Predicting commuter flows in spatial networks using a radiation model based on temporal ranges // *Nature Communications*. 2014. Vol. 5. № 1. P. 5347.
- Simini F., González M.C., Maritan A., Barabási A.L.* A universal model for mobility and migration patterns // *Nature*. 2012. Vol. 484. № 7392. P. 96–100.
- Simini F., Maritan A., Neda Z.* Human mobility in a continuum approach // *PloS ONE*. 2013. Vol. 8. № 3. P. e60069.
- Stouffer S.A.* Intervening opportunities: a theory relating mobility and distance // *American Sociological Review*. 1940. Vol. 5. № 6. P. 845–867.
- Uitermark J., Van Meeteren M.* Geographical network analysis // *Tijdschrift Voor Economische en Sociale Geografie*. 2021. Vol. 112. № 4. P. 337–350.
- Voronoi G.* Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs // *J. Für Die Reine und Angewandte Mathematik (Crelles Journal)*. 1908. Vol. 1908. № 134. P. 198–287.
- Wen H., Zhao D., Wang W., Hua X., Yu W.* Exploring the spatial distribution structure of intercity human mobility networks under multimodal transportation systems in China // *J. Transport Geogr.* 2025. Vol. 123. P. 104144.
- Wilson A.G., Senior M.L.* Some Relationships between Entropy Maximizing Models, Mathematical Programming Models, and Their Duals // *J. Reg. Sci.* 1974. Vol. 14. № 2. P. 207–215.
- Yang Y., Herrera C., Eagle N., González M.C.* Limits of predictability in commuting flows in the absence of data for calibration // *Scientific Reports*. 2014. Vol. 4. № 1. P. 5662.

## Modeling Connections in Urban Networks: Distance, Gravity, Radiation (the Case of the USA)

R. A. Dokhov<sup>a, b, \*</sup>, M. A. Topnikov<sup>b</sup>, and A. S. Voloshok<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

<sup>b</sup>Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*e-mail: dokhov@geogr.msu.ru

The network revolution has breathed new life into the study of spatial nodal structures. While data on the centers and their characteristics are often available, data on connections are still relatively rare, especially when it is necessary to consider network dynamics over a long period of time. This makes it relevant to consider various approaches to modeling connections between points with known attributes. Such approaches can be grouped into three: nearest neighbor, gravity, and radiation models. The first two have become quite widespread in human geography, spatial economics and regional studies, while radiation models were proposed just over a decade ago and remain little known. We understand the volume of connections in urban networks as the potential volume of diverse flows between them. We model the US urban network for 2010 in three variants. Then we focus on geographical and structural differences and provide some quantitative comparisons. The nearest neighbor method makes it easy to identify the main dividing lines in the urban network and show the main urbanization gradients, but does not allow one to evaluate the strength of connections and misses their multiplicity. The gravity model depends on the calibration of the distance decay parameter and prioritizes links between nearby large cities as well as upward links between medium-sized cities and their nearest large neighbor, emphasizing the hierarchy of urban networks. The radiation model gives more weight to links between nearby cities of similar sizes and shows a smaller range of link strengths, emphasizing the “flat” nature of the network ontology.

*Keywords:* urban studies, USA, urban systems, network models, cardinal places

### REFERENCES

- Anderson J. Ideology in geography: an introduction. *Antipode*, 1985, vol. 17, no. 2–3, pp. 28–34.
- Batty M. *The New Science of Cities*. MIT Press, 2013. 520 p.
- Berry B.J.L. Cities as systems within systems of cities. *Pap. Reg. Sci.*, 1964, vol. 13, no. 1, pp. 147–163.
- Blanutsa V.I. Geographical investigation of the network world: Basic principles and promising directions. *Geogr. Nat. Resour.*, 2012, vol. 33, pp. 1–9.
- Blumenfeld-Lieberthal E., Portugali J. Network cities: A complexity-network approach to urban dynamics and development. In *Geospatial Analysis and Modelling of Urban Structure and Dynamics*. Springer Netherlands, 2010, pp. 77–90.
- Bretagnolle A., Delisle F., Mathian H., Vatin G. Urbanization of the United States over two centuries: an approach based on a long-term database (1790–2010). *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2015, vol. 29, no. 5, pp. 850–867.
- Camagni R. P., Salone C. Network urban structures in northern Italy: elements for a theoretical framework. *Urban Stud.*, 1993, vol. 30, no. 6, pp. 1053–1064.
- Derudder B. Network analysis of ‘urban systems’: potential, challenges, and pitfalls. *Tijdschr. Econ. Soc. Geogr.*, 2021, vol. 112, no. 4, pp. 404–420.
- Elliott H.M. Macrocalifornia and the Urban Gradient. *Calif. Geogr.*, 1981, vol. 21, pp. 1–17.
- Elliott H.M. The Pacific coast nearest larger neighbor gradient. *APCG Yearbook*, 1982, vol. 44, pp. 29–45.
- Elliott H.M. Surrounding larger neighbors and the Atlantic coast cardinal neighbor gradient. *Econ. Geogr.*, 1983, vol. 59, no. 4, pp. 426–444.
- Elliott H.M. Cardinal place geometry in the American South. *Southeast. Geogr.*, 1984a, vol. 24, no. 2, pp. 65–77.
- Elliott H.M. Cardinal Places and the Urban Gradient. *Urban Geogr.*, 1984b, vol. 5, no. 3, pp. 223–239.
- Elliott H.M. Cardinal place geometry. *Geogr. Anal.*, 1985, vol. 17, no. 1, pp. 16–35.
- Elliott H.M. Changing spatial structure in the Rocky Mountain regional system. *APCG Yearbook*, 1986, vol. 48, pp. 149–167.
- Evteev O.A. The map of the potential of the settlement field as a special type of image of the population of the territory. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 1969, no. 2, pp. 72–76. (In Russ.).
- Florida R. The world is spiky. *Atl. Mo.*, 2005, vol. 296, no. 3, pp. 48–51.
- Florida R., Gulden T., Mellander C. The rise of the mega-region. *Camb. J. Reg. Econ. Soc.*, 2008, vol. 1, no. 3, pp. 459–476.
- Friedman T. *The World is Flat: A Brief History of the Globalized World in the 21<sup>st</sup> Century*. New York: Farrar, Straus and Giroux, 2005. 488 p.
- Fujita M., Krugman P.R., Venables A. *The spatial economy: Cities, regions, and international trade*. MIT press, 2001. 367 p.
- Glezer O.B. Using urban population potential surface for analyzing urbanization in rural areas (with particular

- reference to Dagestan ASSR). *Soviet Geography*, 1985, vol. XXVI, no. 4, pp. 252–267.
- Haggett P., Chorley R.J. Models, paradigms and the new geography. In *Integrated Models in Geography*. Worcester, London: Methuen & Co, 1967, pp. 19–41.
- Khanna P. *Connectography: Mapping the future of global civilization*. New York: Penguin Random House, 2016. 496 p.
- Lee S., Joo H. Passenger and freight travel patterns: A cluster analysis based on urban networks. *PLoS ONE*, 2025, vol. 20, no. 3, art. e0318084.
- Lenormand M., Huet S., Gargiulo F., Deffuant G. A universal model of commuting networks. *PLoS ONE*, 2012, vol. 7, no. 10, art. e45985.
- Lukermann F., Porter P.W. Gravity and potential models in economic geography. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 1960, vol. 50, no. 4, pp. 493–504.
- Masucci A.P., Serras J., Johansson A., Batty M. Gravity versus radiation models: On the importance of scale and heterogeneity in commuting flows. *Phys. Rev. E*, 2013, vol. 88, no. 2, art. 022812.
- Marston S.A., Jones III J.P., Woodward K. Human geography without scale. *Trans. Inst. Br. Geogr.*, 2005, vol. 30, no. 4, pp. 416–432.
- Medvedkov Yu.V. *Ekonomgeograficheskaya izuchennost' raionov kapitalisticheskogo mira. T. 2* [Economic-Geographical State of Knowledge of the Regions of the Capitalist World. Vol. 2]. Moscow: VINITI Publ., 1965.
- Okabe A. Satoh T., Furuta T., Suzuki A., Okano K. Generalized network Voronoi diagrams: Concepts, computational methods, and applications. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 2008, vol. 22, no. 9, pp. 965–994.
- Piovani D., Arcaute E., Uchoa G., Wilson A., Batty M. Measuring accessibility using gravity and radiation models. *R. Soc. Open Sci.*, 2018, vol. 5, no. 9, art. 171668.
- Polyan P.M. Study of territorial structures by the potential method (using the example of machine-building industry of foreign European countries-members of the Comecon). *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Geogr.*, 1976, no. 4, pp. 94–101. (In Russ.).
- Popov F. On aims and methods in the study of urban zones of mental influence. *Gorod. Issled. Praktiki*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 13–32. (In Russ.).
- Pumain D., Reuillon R. *Urban dynamics and simulation models*. Cham: Springer, 2017. 123 p.
- Reilly W.J. *The law of retail gravitation*. New York: Knickerbocker Press, 1931. 75 p.
- Ren Y., Ercsey-Ravasz M., Wang P., González M. C., Toroczkai Z. Predicting commuter flows in spatial networks using a radiation model based on temporal ranges. *Nat. Commun.*, 2014, vol. 5, no. 1, art. 5347.
- Ricardo D. *On the principles of political economy and taxation*. London: John Murray, 1817. 589 p.
- Sheludkov A.V., Orlov M.A. Topology of a settlement network as a factor of rural population dynamics (a case study of Tyumen oblast). *Reg. Res. Rus.*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 388–400.  
<https://doi.org/10.1134/s2079970520030119>
- Simini F., González M.C., Maritan A., Barabási A.L. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*, 2012, vol. 484, no. 7392, pp. 96–100.
- Simini F., Maritan A., Neda Z. Human mobility in a continuum approach. *PLoS ONE*, 2013, vol. 8, no. 3, art. e60069.
- Sinitsyn N.A. Regionalization of Russia-Belarus borderlands with demographic potential method. *Reg. Issled.*, 2021, no. 2, pp. 32–47. (In Russ.).
- Smirnyagin L.V. Delineation of the influence zones of cities by the method of main potentials. In *Problemy sovremennoi urbanizatsii* [Problems of Modern Urbanization]. Moscow: MFGO Publ., 1985, pp. 95–105. (In Russ.).
- Smirnyagin L.V. *Raiony SShA: portret sovremennoi Ameriki* [The Regions of the United States: A Portrait of Modern America]. Moscow: Mysl' Publ., 1989. 380 p.
- Smirnyagin L.V. Regionalization of society: Methodology and algorithms. In *Voprosy ekonomicheskoi i politicheskoi geografii zarubezhnykh stran. T. 19* [Issues of Economic and Political Geography of Foreign Countries. Vol. 19]. Moscow, Smolensk: Oikumena Publ., 2011a, pp. 55–82. (In Russ.).
- Smirnyagin L.V. Megaregions as a new form of the territorial organization of society. *Vestn. Mosk. Univ., Ser. 5: Geogr.*, 2011b, no. 1, pp. 9–15. (In Russ.).
- Smith A. *An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations. Vol. 1*. London: Printed for W. Strahan and T. Cadell, 1776. 510 p.
- Stouffer S.A. Intervening opportunities: a theory relating mobility and distance. *Am. Sociol. Rev.*, 1940, vol. 5, no. 6, pp. 845–867.
- Treivish A.I. The attempt of delineation of zones of potential influence of the USSR cities. In *Problemy sovremennoi urbanizatsii* [Problems of Modern Urbanization]. Moscow: MFGO Publ., 1985, pp. 105–113. (In Russ.).
- Uitermark J., van Meeteren M. Geographical network analysis. *Tijdschr. Econ. Soc. Geogr.*, 2021, vol. 112, no. 4, pp. 337–350.
- Voronoi G. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs. *J. Reine Angew. Math.*, 1908, no. 134, pp. 198–287. (In French).
- Wen H., Zhao D., Wang W., Hua X., Yu W. Exploring the spatial distribution structure of intercity human mobility networks under multimodal transportation systems in China. *J. Trans. Geogr.*, 2025, vol. 123, art. 104144.
- Wilson A.G., Senior M.L. Some Relationships between Entropy Maximizing Models, Mathematical Programming Models, and Their Duals. *J. Reg. Sci.*, 1974, vol. 14, no. 2, pp. 207–215.
- Yang Y., Herrera C., Eagle N., González M.C. Limits of predictability in commuting flows in the absence of data for calibration. *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, no. 1, art. 5662.