ИЗВЕСТИЯ РАН. СЕРИЯ ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ, 2014, № 6, с. 7–16

ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

УДК 911.5/.9

"Фракталы – это больше, чем милая картинка…"
Дж. Какалиос, Журнал "Complexity", 1996.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ФРАКТАЛОВ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ СИСТЕМ РАЗМЫТЫХ ЦЕНТРАЛЬНЫХ МЕСТ

© 2014 г. П.П. Эм

Институт географии РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 27.01.2014 г.

С середины 1990-х гг. теория фракталов стала методической основой исследований, посвященных изучению территориальной организации населения. В настоящей работе предпринята попытка применения фракталов для анализа гетерогенности распределения центральных функций в системе размытых центральных мест на примере столичной агломерации Республики Корея.

1. Фракталы – новый подход к пространственному анализу. В подавляющем большинстве исследований по теоретической географии используется аксиома об абсолютной однородности пространства. Осознавая его гетерогенность, географы не могли отказаться от пресловутой гомогенности, поскольку были "заложниками" евклидовой геометрии. Подлинным научным прорывом стала *теория фракталов*, представленная Бенуа Мандельбротом в 1977 г. [1]. С тех пор все чаще и чаще фракталы используются в зарубежных экономико-географических исследованиях [6–9, 13, 15–17].

Фракталом называется геометрическая фигура, составленная из *n*-ого количества частей, каждая из которых подобна всей фигуре в целом (рис. 1). Каждый фрактал имеет в своей структуре базовую фигуру. Рассмотрим формирование так называемого *ковра Серпинского*, в основании которого лежит квадрат с длиной стороны L (рис. 1-А). Зададим генератор, образованный 5 квадратами ($N = 5$), с фактором $r = 1/3$ (рис. 1-Б). Он напоминает часть шахматной доски, каждый элемент которой подобен полученной фигуре. Длина стороны фигуры на рис. 1-Б рассчитывается как:

$$l_1 = r \cdot L = \frac{1}{3}L. \quad (1)$$

На следующем этапе все элементы генератора заменяются его уменьшенной копией (рис. 1-В). Количество элементов фигуры на рис. 1-В рассчитывается как:

$$N_2 = N^2 = 25. \quad (2)$$

Новая фигура состоит из 25 квадратов, каждый из которых подобен исходному, и всей фигуре в целом (рис. 1-В). Длина стороны всех элементов на рис. 1-В составляет:

$$l_2 = r^2 \cdot L = \frac{1}{9}L. \quad (3)$$

Полученная на рис. 1-В фигура больше не похожа на шахматную доску из-за наличия пустых зон, называемых *лакунами* [16]. Благодаря последним в системе отмечена пространственная иерархия элементов. Наличие иерархии внутри ковра Серпинского свидетельствует о гетерогенном распределении его элементов.

Мультипликация базовой фигуры может быть проведена бесконечное количество раз (n). Зададим уравнения общего вида для вычисления ключевых показателей. Количество элементов искомого фрактала составляет:

$$N_n = N^2. \quad (4)$$

Для расчета длины линии каждого элемента используется формула:

$$l_n = r^n \cdot L, \quad (5)$$

а значит – площадь конечного фрактала можно вычислить как:

$$S_n = l_n^2. \quad (6)$$

Общая площадь генерированного на рис. 1 фрактала равна:

$$S_n = N_n \cdot a_n = (N \cdot r^2)^n \cdot L^2, \quad (7)$$

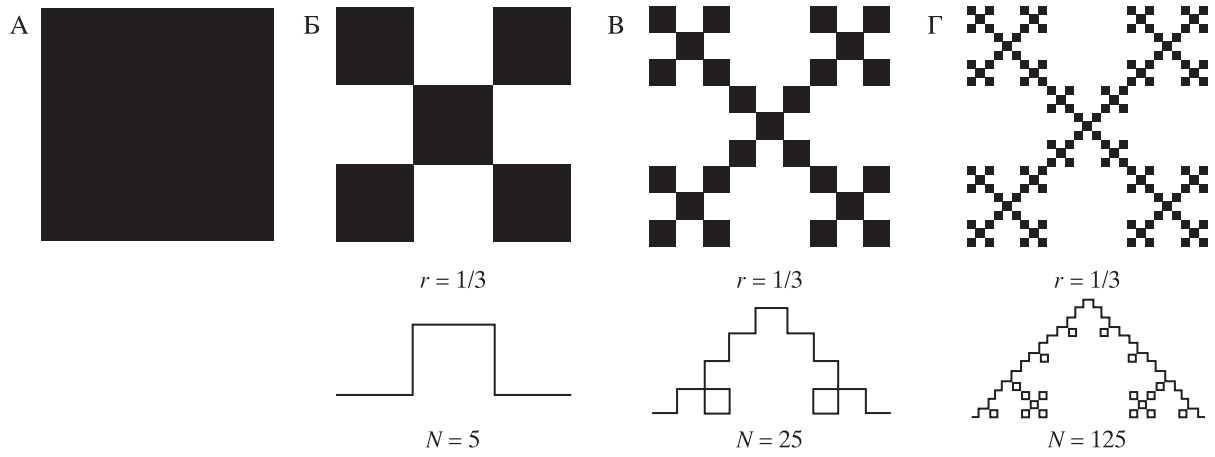

Рис. 1. Построение ковра Серпинского (по: [9]).

а его периметр [13]:

$$P_n = N_n \cdot 4 \cdot l_n = (N \cdot r)^n \cdot 4 \cdot L. \quad (8)$$

В соответствии с евклидовой геометрией линия имеет размерность 1. Однако при увеличении n показатель S_n будет стремиться к нулю, а P_n – к бесконечно большому значению. Если длина линии стремится к бесконечному значению, значит – размерность полученной фигуры больше, чем 1. Учитывая величину площади и периметр, фрактальная размерность (D) не соответствует представлениям традиционной геометрии. По словам Пьера Франхаузера евклидова геометрия – это «всего лишь частный случай фрактальной» [13, с. 210]. D определяется как [13]:

$$D = \frac{\log N}{\log(1/r)}. \quad (9)$$

Значения D подчинены неравенству $1 < D < 2$ [13]. $D = 2$, когда изучаемая масса равномерно распределена по изучаемой поверхности. Чем больше отклонение D от 2, тем больше лакун в изучаемых структурах.

Итак, фракталы – это самоподобные геометрические фигуры с наличием иерархической структуры слагающих элементов. Данным фактом обусловлена их внутренняя гетерогенность. Следовательно, фракталы могут способствовать изучению гетерогенности систем размытых центральных мест, распределение центральных функций в которых также не отличается однородностью.

2. Аксиоматический аппарат концепции размытых центральных мест был разработан для решения некоторых проблем классической теории Вальтера Кристаллера [10] в условиях постиндустриального развития. Во-первых, теория центральных мест представляла элементы системы расселения как точки в однородном пространстве. Города и городские агломерации настолько крупны по размерам и неоднородны, что их генерализация до уровня точек лишает теорию смысла. Во-вторых, величина центральных функций сильно дифференцирована в пределах урбанизированных форм расселения. В-третьих, не только города имеют центральные функции, но также и села, выполняющие функцию поставщиков центральных функций для жителей близлежащих мелких поселков. Изложим основные принципы концепции размытых центральных мест, представленной нами ранее в [4].

Элементом системы размытых центральных мест называется ограниченная область множества точек пространства. Элемент, обладающий n-ной величиной объема центральных функций, называется *размытым центральным местом*, а тот, в котором центральные функции отсутствуют, составляет *дополнительный район*. Под величиной объема центральных функций понимается их количественная характеристика в пределах размытых центральных мест. Границами элементов системы размытых центральных мест предлагается использовать контуры низовых элементов административно-территориального деления.

Потребности населения оказывают решающее влияние на формирование систем размытых центральных мест. При увеличении плотности расположения предприятий, обладающих центральными функциями, повышается разнообразие услуг, а также возможность удовлетворения потребностей в центральных продуктах. В Республике Корея границы элементов системы размытых центральных мест были установлены по уездам и городам в пределах провинций, а также по муниципальным районам в пределах городов

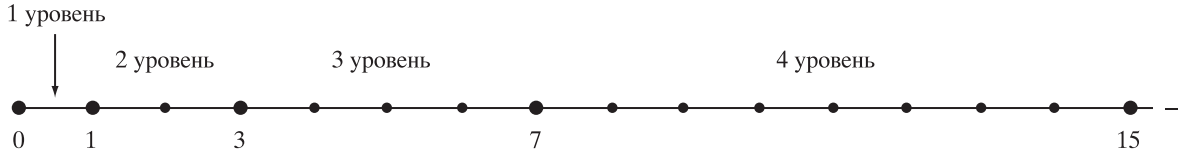

Рис. 2. Вспомогательный числовой отрезок для распределения элементов системы размытых центральных мест по уровням иерархии.

с особым статусом[1]. Значение коэффициента корреляции между плотностью предприятий сферы услуг и плотностью населения 0.72 с 2000 по 2009 гг. доказало наличие тесной связи между рассмотренными показателями. В связи с этим, *величина объема центральных функций в размытом центральном месте прямо пропорциональна его средней плотности населения*. Она измеряется в единицах.

Размещение центральных функций никогда не было равномерным. Стремительное развитие урбанизации во второй половине XX – начале XXI в. способствовало усилению территориальных диспропорций. Принято положение о неоднородном *распределении центральных функций*. Изменение некоторых постулатов теории центральных мест не влияет на рациональное поведение потребителей. При отсутствии искомого товара или услуги в нём, выбор подходящего элемента системы для его покупки зависит от комплекса факторов, основными из которых являются вид центрального продукта и расстояние, которое необходимо преодолеть.

Согласно логике классической теории в центральном месте низшего уровня располагаются только базовые учреждения, например, начальные школы, обслуживающие небольшой сервисный район. За ними следуют средние школы, и так далее вплоть до университетов – поставщиков услуг высшего уровня. В элементах системы размытых центральных мест с малой величиной объема центральных функций могут встречаться не только высшие школы, но и университеты. Размытые центральные места с университетским кампусом вдали от густонаселенных районов будут иметь небольшую величину объема центральных функций, но будут предоставлять услуги высшего уровня. Следовательно, нарушается вышеизложенный принцип классической теории.

Для распределения элементов системы размытых центральных мест по уровням иерархии была предпринята попытка установить соотношения между средними величинами объемов центральных функций, соответствующих различным уровням иерархии. Для этого было изучено распределение образовательных, медицинских, финансово-кредитных, почтовых учреждений, а также предприятий торговли, общественного питания и охраны правопорядка в Республике Корея, и сочетаниях ее провинций и городов с особым статусом с 1990 по 2009 гг.

Были установлены отношения средней величины объема центральных функций элементов иерархических уровней к аналогичным величинам в других. Они составили (с IV по I уровень соответственно): 1–0.5–0.25–0.1 [3]. Для распределения размытых центральных мест по уровням иерархии предлагается использовать вспомогательный отрезок, начало которого соответствует нулю, а конец – максимальной величине объема центральных функций среди элементов системы (рис. 2). Далее устанавливаются числовые границы каждого уровня. Например, если максимально зафиксированная величина объема центральных функций в гипотетической системе размытых центральных мест с четырьмя уровнями иерархии составляет 15 000 единиц, то с 0 по 999 расположатся элементы первого уровня, с 1000 до 2999 – второго, с 3000 до 6999 – третьего и с 7000 до 15 000 – четвертого. Если в системе размытых центральных функций выделяется большее (меньшее) количество иерархических уровней, длина числового отрезка увеличивается (уменьшается) в соответствии с установленным правилом.

Ключевым показателем в концепции размытых центральных мест является *показатель равновесия ключевых центров*:

$$\sum \frac{S_c}{S_h} = m - 1 - c, \qquad (11)$$

где S_c – среднее расстояние между административными центрами размытых центральынх мест двух смежных уровней иерархии, S_h – среднее расстояние между центрами их тяжести, m – общее число уровней, c – число отсутствующих уровней [4]. Расстояния рассчитываются от элементов низких уровней иерархии к элементам более вы-

[1] В Республике Корея 7 городов с особым статусом: Сеул, Пусан, Тэгу, Инчхон, Кванджу, Ульсан, Тэджон.

сокого уровня, расположенных на минимальном расстоянии. Показатель $\sum \frac{S_c}{S_h}$ позволяет оценить уравновешенность ожидаемого и реального фокуса локализации центральных функций.

Для построения графической модели размытых центральных мест принимается допущение о соответствии величины объема центральных функций в элементе системы его значению в центре тяжести. С использованием их в качестве высот и *IDW интерполяции* был построен *квазирельеф центральных функций*, отражающий неоднородное распределение центральных функций в пространстве. Идея квазирельефа была выдвинута профессором В.А. Шупером в личной беседе с автором. Моделирование квазирельефа центральных функций проведено с помощью программы *Arc GIS 9*.

В качестве относительных высот квазирельефа центральных функций использовались элементы арифметической прогрессии, первый член которой равен нулю, а шаг – 50 единицам. После установления каждой относительной высоты проверялось улучшение соответствия ключевого показателя теоретическому значению. "Игра" высотами продолжалась до нахождения наилучшего соответствия показателя равновесия ключевых центров теоретическому значению, а значит – оптимальной модификации системы. Элементы систем размытых центральных мест с меньшей величиной объема центральных функций в базовой модификации, чем относительная высота, составят дополнительный район и "затопятся" на квазирельефе центральных функций.

3. Столичная агломерация Республики Корея как система размытых центральных мест. При увеличении численности населения Республики Корея с 1950 по 2010 гг. в 2.6 раза (с 18.9 млн до 48.7 млн чел.), уровень урбанизации в ней возрос почти в 4 раза (с 21.4 до 81.9%) [18]. Характер урбанизации определяется низким начальным уровнем и очень высокой скоростью [5]. Общее количество городов Республики Корея с 1950 по 2010 гг. увеличилось в 4.4 раза: с 19 до 84. В 1950 г. только столица была городом-миллионером, а в 2010 г. подобным статусом обладали уже 8 городов. В них проживало почти 50.4% населения страны.

В конце XX в. – начале XXI в. активное экономическое развитие Республики Корея способствовало укреплению связей между крупнейшими городами и населенными пунктами в непосредственной близости от них, усилению потоков маятниковых миграций, существенному разрастанию и развитию пригородных зон и городов-спутников. Приведенные факты указывают на развитие городских агломераций, "размывших" административные границы городов.

Для установления границ столичной агломерации Республики Корея была использована методика П.М. Поляна [2]. Основа принятого в ней подхода – изучение транспортной доступности точек пространства от города-ядра. Были выделены 0.5-, 1- и 1.5-часовые изохроны, соответствующие I, II и III поясам удаленности от города-ядра. Города-спутники с населением более 50 тыс. чел., находящиеся вне 1.5-часовой изохроны, включаются в состав агломерации, если на последнюю накладывался ареал их собственной 0.5-часовой изохроны. Если город-спутник находится в III поясе доступности, то в состав агломерации включалась и часть территории, выделенная его 0.5-часовой изохроной. Эта территория составила IV пояс. Границы агломераций выделялись вокруг городов с особым статусом по совмещенному контуру их III и IV поясов.

Для определения транспортной удаленности точек пространства от ядер столичной агломерации при движении на личном автомобиле использована система *Daum Chido* [11]. Виртуальный маршрут проходил в ночное время для исключения эффекта заторов, по возможности, по скоростным автомагистралям. Для оценки времени, затрачиваемого на движение с использованием общественного транспорта, была использована система *Google Map* [14], учитывающая расходы времени на пересадки и среднее время ожидания транспорта. Большие затраты времени выявлены при движении на общественном транспорте. Для Республики Корея с высокой среднедушевой обеспеченностью автомобилями показатель транспортной удаленности с использованием общественного транспорта играет лишь корректирующую роль при выделении финальных изохрон.

Коэффициент развитости агломерации вычисляется как:

$$K_d = P \cdot (M \cdot m + N \cdot n), \qquad (12)$$

где P – численность городского населения агломерации; M – количество городов в агломерации, N – количество поселков городского типа; m и n – доли городского и сельского населения агломерации [2]. Агломерация должна иметь $K_d > 1$.

Главным элементом системы расселения Республики Корея всегда была *Сеульская агломерация*. Непрерывное увеличение площади ее ядра было обусловлено столичным статусом. Рядом с

Сеульской обособленно развивалась *Инчхонская агломерация*. Они сближались и образовали в конце 1980-х гг. двухъядерную *столичную конурбацию*. Она постепенно расширялась, практически полностью заняв территорию провинции Кёнгидо и небольшие части соседних провинций (рис. 3). В 2005 г. между Сеулом и развивающимся Тэджоном появился город-миллионер – Сувон, ставший третьим ядром Столичной *конурбации*. Ее главные элементы соединены развитой сетью метрополитена. Отрицательный миграционный прирост Сеула объясняется переездом людей из шумной столицы в более дешевые и экологически чистые районы недалеко от Сеула.

Выбор объекта настоящего исследования был обусловлен специфическим положением столичной агломерации в жизни Республики Корея. Именно с подъема территории, прилегающей к *р. Ханган*, разделяющей Сеул наполовину, началось бурное развитие этой страны, причисленной к группе *азиатских тигров*. Сегодня в пределах столичной агломерации проживает около 50% населения страны и производится около 48.6% ее ВВП.

В 2010 г. на территории столичной агломерации с общей численностью населения 23.8 млн жителей было расположено 73 населенных пункта, в том числе 45 поселков. За пределами города-ядра проживало 49.6% населения, но только 0.6% населения агломерации вели сельский образ жизни. Столичная агломерация в 2010 г. имела $K_d = 32.7$ и в соответствии с классификацией П.М. Поляна являлась *сильно развитой* [2].

Для выявления дифференциации центральных функций в пределах городских агломераций было проведено сравнение средней величины объемов центральных функций в разных поясах агломераций. В 2011 г. I пояс столичной агломерации включал все муниципальные округа г. Сеула помимо Новонгу, г. Инчхон, а также г. Сувон, г. Пучхон, г. Коян и г. Квачхон (рис. 3). В пределах 0.5-часовой изохроны средняя величина объема центральных функций составила около 27 тыс. единиц. В I поясе столичной агломерации можно удовлетворить практически все потребности в центральных продуктах. В промежутке между 0.5- и 1-часовой изохронами располагаются: 14 городов провинции Кёнгидо и вышеупомянутый округ Сеула. III пояс объединяет 7 городов и 4 уезда столичной провинции, а также два города из соседних провинций. Средняя величина объема центральных функций во II поясе в 5.8 раз меньше, чем в I. Резкий переход отмечен также между II и III поясами агломерации. IV пояс включал в себя части трех городов. В нём отмечено повышение величины среднего объема центральных функций в 0.8 раза относительно аналогичного показателя в предшествующем поясе. Таким образом, средняя величина объема центральных функций в столичной агломерации Республики Корея в 2011 г. с I по III пояса уменьшалась, но в IV поясе – вновь увеличилась.

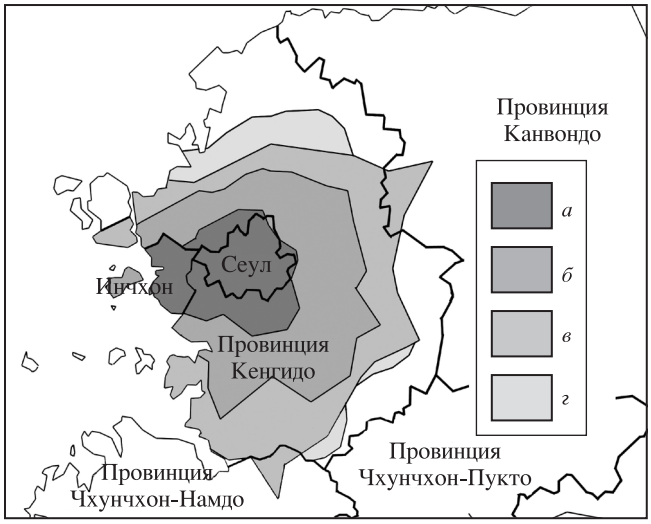

Рис. 3. Пояса Столичной агломерации Республики Корея (составлено по расчетным данным).
Буквами на карте обозначены: *а* – первый пояс агломерации, *б* – второй пояс агломерации, *в* – третий пояс агломерации, *г* – четвертый пояс агломерации.

Рассмотрим дифференциацию локализации центральных функций в пределах столичной агломерации более подробно. Столичная агломерация имела как элемент Янчхонгу с максимальной величиной объема центральных функций в Республике Корея (более 26.7 тыс. единиц), так и элементы без центральных функций. В ее состав в 2011 г. входили 24 элемента высшего иерархического уровня, 13 – третьего, 8 – второго и 16 – первого. Для наглядной демонстрации разброса величины объема центральных функций в элементах столичной агломерации Республики Корея был построен профиль квазирельефа центральных функций. Разрез был сделан от муниципального района Чунгу в составе Инчхона (А) до г. Чхунчхона (В) (рис. 4). Он отразил значительную дифференциацию величины объема центральных функций в элементах изучаемой системы [3].

4. Методика анализа фрактальных структур внутри систем размытых центральных мест. В данном исследовании принято положение, согласно которому подавляющая часть центральных функций поставляется потребителям внут-

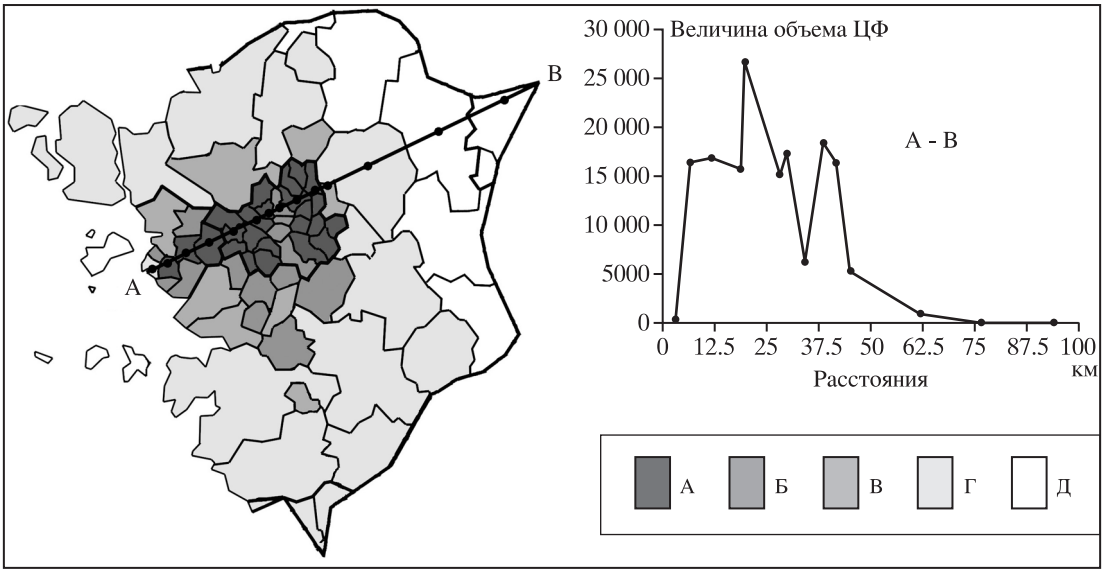

Рис. 4. Профиль квазирельефа центральных функций Столичной агломерации Республики Корея (составлено по расчетным данным).
Буквами обозначены: А – элементы первого уровня, Б – элементы второго уровня, В – элементы третьего уровня, Г – элементы четвертого уровня, Д – элементы дополнительного района.

ри определенных зданий. Следовательно – чем выше плотность застройки, тем больший объем центральных функций может быть предоставлен потребителям. В исследовании учитывается не различная функциональная принадлежность зданий, а только их размер и координаты локализации. Предлагается рассчитать фрактальную размерность по контурам застройки зданий внутри элементов системы размытых центральных мест. Она позволит изучить морфологические особенности распределения центральных функций.

Для изучения фракталов внутри размытых центральных мест было использовано программное обеспечение *Fractalyse 2.4.1*, разработанное Жилем Вуиделом [12]. Это приложение работает только с 2-битными изображениями и позволяет проводить фрактальный анализ всевозможными методами. Для подготовки вспомогательного картографического материала были использованы космические снимки, размещенные в *Google Map* [14]. Далее в программной среде *Adobe Photoshop CS5* создавался новый слой, на который наносились пунсоны различной толщины в зависимости от размера зданий на снимке. В результате получались требуемые картограммы городской застройки различных элементов системы размытых центральных мест столичной агломерации Республики Корея. Постройка вспомогательной картограммы – долгий и кропотливый процесс. В связи с этим обстоятельством они были построены лишь для административно-территориальных единиц более низкого уровня, в которых расположен центр тяжести центральных функций изучаемого размытого центрального места. Подобный подход дает представление о степени гетерогенности застройки, а значит – о степени однородности распределения центральных функций в пространстве.

Существует несколько альтернативных способов определения фрактальной размерности изучаемой территории. Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Мы подробно опишем лишь те методы, которые зарубежные коллеги считают оптимальными [9, 15, 16]. Автор в ходе более чем сотни эмпирических симуляций также удостоверился в их оптимальности.

Первым является *метод дилатации (расширения)*. Его суть состоит в том, что каждая точка окружается квадратом размера ε, поверхность которого считается заполненной. Далее размер квадратов, как и площадь покрытой поверхности постепенно увеличивается. Базовым элементом вспомогательных карт является пиксель. В процессе первого шага дилатации каждый пиксель на карте окружается квадратной рамкой, толщина которой составляет 1 пиксель. При втором шаге дилатации каждый пиксель окружается квадратной рамкой, толщиной в 2 пикселя. В дальнейшем рамка утолщается в соответствии с величиной шага дилатации. Поскольку размер квадратов увеличивается, любые детали меньше размера структурного элемента генерализируются. Таким образом, постепенно получается приближение

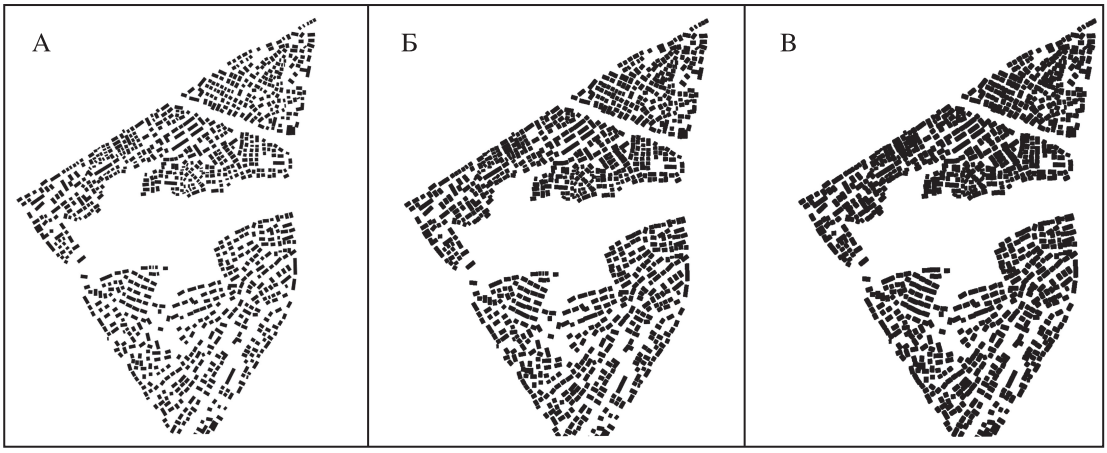

Рис. 5. Моделирование дилатации (составлено с помощью симуляций в программе Fractalyse).
Буквами обозначены: А – базовая модель, Б – модель, полученная после дилатации в 2 шага, В – модель, полученная после дилатации в 4 шага.

к исходной форме. Рассчитывается количество квадратов, необходимых для покрытия изучаемого изображения.

Для каждого муниципального района в составе различных элементов системы размытых центральных мест столичной агломерации Республики Корея было произведено не менее 10 симуляций с различным шагом дилатации. Программа Fractalyse рассчитывает не только значение фрактальной размерности D_d, но также и ряд вспомогательных коэффициентов. Из полученного ряда эмпирических данных по структурным элементам административно-территориального деления в составе размытых центральных мест оптимальными считались те показатели D_d, в которых значение поправочного коэффициента корреляции $K_a > 0.999$. На рис. 5 представлен пример процесса дилатации части размытого центрального места Содэмун в составе столичной агломерации Республики Корея. На рис. 5-Б изображена полученная картограмма при шаге дилатации 2 с $D = 1.735$ и $K_a = 1$. При шаге дилатации 4, $D = 1.681$, а $K_a = 0.9994$ (рис. 5-В). Видно, что размер пунсонов на рис. 5-В после 4 шагов дилатации значительно больше, чем у первоначальной картограммы (рис. 5-А).

Вторым надежным методом является *корреляционный анализ*. Его суть состоит в подсчете количества точек на определенном расстоянии от каждой закрашенной точки. Подобный анализ дает представление о распределении занятых точек. Для каждого муниципального района была проведена одна манипуляции в программе Fractalyse. Временные затраты на расчет фрактальной размерности в каждом конкретном случае варьировал от 15 минут до 2 часов 50 минут!

5. Эмпирическая проверка применимости фракталов для изучения системы размытых центральных мест столичной агломерации Республики Корея была проведена на примере элементов, по данным которых был построен профиль квазирельефа центральных функций (рис. 4). Фрактальная размерность размытых центральных мест в составе столичной агломерации Республики Корея была определена с использованием вышеописанных методов дилатации и корреляции. По расчетным данным, представленным в табл. 1, видно, что значения D_c удовлетворяют необходимому требованию $K_a > 0.999$. Однако при использовании метода дилатации удалось установить величину фрактальной размерности D_d для всех рассматриваемых элементов системы, при которой $K_a = 1$, то есть совпадает идеально. Поэтому при выборе значения фрактальной размерности для всех изученных элементов столичной агломерации Республики Корея были использованы значения, полученные при использовании метода дилатации (табл. 1).

Наличие значительных расхождений величин фрактальной размерности D_d и D_c для одних и тех же районов, рассчитанных с использованием метода дилатации и корреляции соответственно, может показаться странным (табл. 1). Однако не стоит забывать о том, что, помимо D программа Fractalyse рассчитывает и вспомогательные коэффициенты, ключевым из которых является поправочный коэффициент K_a. При использовании метода дилатации удавалось выполнить расчет со 100% точностью при $K_a = 1$ (табл. 1). Следовательно, фрактальная размерность при использовании метода корреляции была рассчитана с погрешностью, иногда со значительной.

Таблица 1. Результаты эмпирической апробации метода дилатации и метода корреляции для определения фрактальной размерности элементов системы размытых центральных мест столичной агломерации Республики Корея (составлено по расчетным данным)

№	РЦМ в составе Столичной агломерации Республики Корея	Провинция или специальный город	Метод дилатации		Метод корреляции		D_d или D_c
			D_d	K_a	D_c	K_a	
1	Чунгу	Инчхон	1.756	1	1.795	0.99998	D_d
2	Намгу	Инчхон	1.744	1	1.841	0.99998	D_d
3	Бупхёнгу	Инчхон	1.84	1	1.627	0.99997	D_d
4	Пучхон	Кёнгидо	1.862	1	1.634	0.9999	D_d
5	Янчхонгу	Сеул	1.775	1	1794	0.99996	D_d
6	Мапогу	Сеул	1.745	1	1.88	0.99998	D_d
7	Содэмунгу	Сеул	1.735	1	1733	0.9999	D_d
8	Чонногу	Сеул	1.763	1	1.822	0.99994	D_d
9	Сонпукгу	Сеул	1.744	1	1.797	0.99996	D_d
10	Новонгу	Сеул	1.812	1	1.771	0.99996	D_d
11	Гури	Кёнгидо	1.763	1	1.862	0.99999	D_d
12	Намъянджу	Кёнгидо	1.778	1	1.641	0.99998	D_d
13	Гапхёнгун	Кёнгидо	1.768	1	1.771	0.99999	D_d
14	Чхунчхон	Канвондо	1.741	1	1.847	0.99999	D_d

В нашем исследовании оптимальным является метод дилатации.

Проведем классификацию изученных размытых центральных мест по показателю фрактальной размерности. К первой группе с низким показателем D относятся: Намгу, Мапогу, Содэмунгу, Сонпукгу и Чхунчхон. Значение фрактальной размерности в них менее 1.75. Это связано с доминированием традиционной одно- и двухэтажной застройки этих элементов системы размытых центральных мест. Большинство зданий было построено в первое десятилетие после войны. Расположение лакун в некоторых размытых центральных местах данной группы еще более снижает и без того низкую степень упорядоченности распределения центральных функций по территории. Во вторую группу со средним значением D входят: Чунгу, Янчхонгу, Чонногу, Гури, Намъянджу, Гапхёнгу. Величина фрактальной размерности в них удовлетворяет неравенству $1.75 < D < 1.8$. В данных элементах системы доминирует традиционная застройка, но присутствуют и обширные современные кварталы. К третьей группе с высокой степенью равномерности распределения центральных функций относятся Бупхёнгу, Пучхон и Новонгу с $D > 1.8$. Бупхёнгу и Новонгу являются типичными плодами субурбанизации, располагаясь в непосредственной близости от Сеула. В структуре данных элементов столичной агломерации преобладают микрорайоны, застроенные упорядоченно многоэтажными домами по разработанному плану. Таким образом, прослеживается тенденция, согласно которой чем более современна застройка изучаемых размытых центральных мест, тем более равномерно в них размещена величина объема центральных функций.

Для оценки изменения равномерности распределения центральных функций по территории столичной агломерации Республики Корея, мы составили тренд изменения показателя D при движении от точки А к точке В в разрезе квазирельефа центральных функций (рис. 6). Полу-

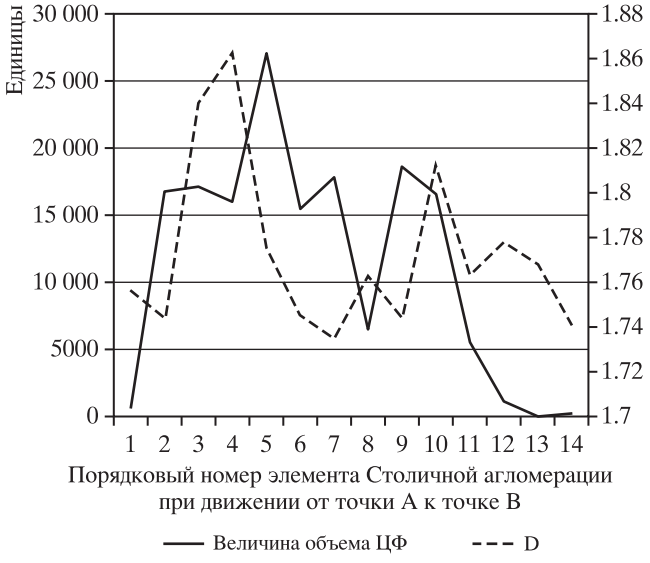

Рис. 6. Динамика величины объема центральных функций и показателя фрактальной размерности в разрезе квазирельефа центральных функций Столичной агломерации Республики Корея (составлено по расчетным данным).

Таблица 2. Смена направления трендов величины объема центральных функций и показателя фрактальной размерности в разрезе квазирельефа центральных функций столичной агломерации Республики Корея (составлено по рис. 6)

Рассматриваемый интервал	Характер изменения величины объема центральных функций	Характер изменения величины фрактальной размерности (*D*)
1 – 2	увеличивается	уменьшается
2 – 3	увеличивается	увеличивается
3 – 4	уменьшается	увеличивается
4 – 5	увеличивается	уменьшается
5 – 6	уменьшается	уменьшается
6 – 7	увеличивается	уменьшается
7 – 8	уменьшается	увеличивается
8 – 9	увеличивается	уменьшается
9 – 10	увеличивается	увеличивается
10 – 11	уменьшается	уменьшается
11 – 12	уменьшается	увеличивается
12 – 13	уменьшается	уменьшается
13 – 14	увеличивается	уменьшается

ченные тренды отразили наличие взаимосвязи между величиной объема центральных функций в размытом центральном месте и степенью равномерности размещения центральных функций внутри него.

В табл. 2 рассмотрена динамика смены направления трендов, построенных по эмпирическим данным величины объема центральных функций и величины фрактальной размерности при движении от 1 к 14 элементу в разрезе квазирельефа центральных функций (рис. 4). По расчетным данным в 75% случаях смена характера движения тренда величины объема центральных функций в одном интервале приводит к аналогичному изменению в тренде величины *D* на следующем отрезке. Значит, увеличение или уменьшение величины объема центральных функций в одном размытом центральном месте, скорее всего, вызовет повышение значения *D* в соседнем элементе системы. Таким образом, чем больше величина объема центральных функций в размытом центральном месте, тем выше гетерогенность распределения центральных функций в соседнем элементе системы.

Мы попытались выявить взаимосвязь между показателями величины объема центральных функций и фрактальной размерностью. Был построен график, по оси абсцисс которого откладывались значения *Ln* величины объема центральных функций, а по оси ординат – величина *D* (рис. 7). Полученный тренд в общем виде напоминает кривую, значения в которой уменьшаются по экспоненте. Мы высказываем гипотезу о возможной экспоненциальной зависимости между величиной объема центральных функций и фрактальной размерностью. Ее детальная эмпирическая проверка будет осуществлена в дальнейших исследованиях автора.

Некоторые выводы. Теория фракталов весьма плодотворна для изучения систем размытых центральных мест. С ее помощью возможно изучение морфологии распределения центральных функций внутри элементов системы. При этом, величина ключевого показателя фрактальной размерности *D* позволяет определить степень равномерности размещения центральных функций внутри размытых центральных мест.

Анализ классификации размытых центральных мест столичной агломерации Республики Корея

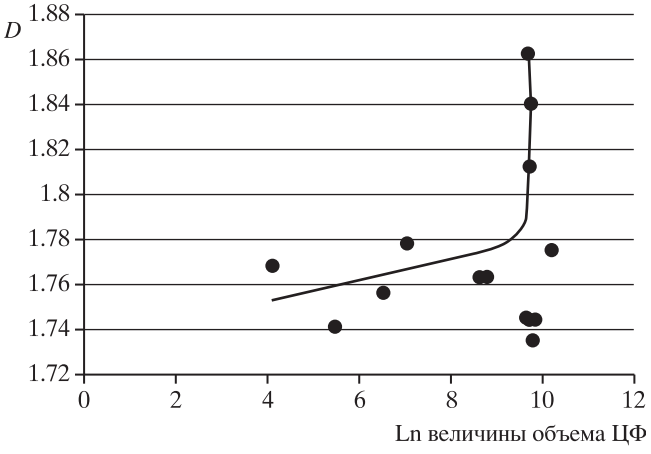

Рис. 7. Взаимоотношение величины объема центральных функций и показателя фрактальной размерности в различных элементах системы размытых центральных мест Столичной агломерации (составлено по расчётным данным).

показал, что равномерность распределения центральных функций намного выше в районах новой застройки, а не традиционной. В ходе эмпирических исследований было установлено, что величина объема центральных функций и фрактальная размерность в элементах системы размытых центральных мест находится в непосредственной зависимости: смена направления величины первого показателя приводит к аналогичному изменению значения второго в соседнем элементе. Установлено, что чем больше величина объема центральных функций в размытом центральном месте, тем выше гетерогенность распределения центральных функций в соседнем элементе системы. Исследуя взаимосвязь между величиной объема центральных функций и фрактальной размерностью, была высказана гипотеза о наличии экспоненциальной связи между данной парой показателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Мандельброт Б.* Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
2. *Полян П.М.* Методика выявления и анализа опорного каркаса расселения. Часть 1. М.: ИГ СССР, 1998. 220 с.
3. *Эм П.П.* Городские агломерации как системы размытых центральных мест (на примере стран Корейского полуострова) // Региональные исследования, 2014 (в печати).
4. *Эм П.П.* Методы изучения систем размытых центральных мест (на примере Республики Корея в начале XXI в.) // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 1. С. 22–30.
5. *Эм П.П.* Региональные особенности развития урбанизации в Республике Корея // Регион. исслед. 2012. № 2. С. 120–133.
6. *Arlinghaus S.L.* Fractals take a central place // Geografiska Annaler, 1985, 67B. P. 83–88.
7. *Batty M., Kim K.S.* Form follow function: reformulating urban population density function // Urban Studies. 1992. V. 29 (7). P. 1043–1070.
8. *Batty M., Longley P.* The fractal simulation of urban structure // Environment and Planning. 1986. A. 18. P. 1143–1179.
9. *Caglioni M., Rabino G.* Contribution to fractal Analysis of cities: A study of metropolitan Area of Milan // Cybergeo – European journal of geography. Режим доступа: http://cybergeo.revues.org/3634
10. *Christaller W.* Central places in Southern Germany. Englewood Cliffs. N.J., 1966. 230 p.
11. Daum Chido. Режим доступа: http://local.daum.net/map
12. Fractalyse 2.4.1. The free software. Режим доступа: http://www.fractalyse.org/
13. *Frankhauser P.* The fractal approach. A new tool for the spatial analysis of urban agglomerations // Population; an English Section. V. 1. № 1. Spec. issue New method. Approaches in the Social Sci. 1998. P. 205–240.
14. Google Map. Режим доступа: https://maps.google.ru/
15. *Tannier C., Pumain D.* Fractasls in urban geography: a theoretical outline and an empirical example // Cybergeo – European journal of geography. Режим доступа: http://cybergeo.revues.org/3275#tocto2n6
16. *Thomas I., Frankhauser P., De Keersmaecker M.-L.* Fractal dimension versus density of built-up surfaces in the periphery of Brussels // Reg. Sci. 2007. V. 86. № 2. P. 287–308.
17. *Thomas I., Tannier C., Frankhauser P.* Is there a link between fractal dimension and residential enviromnet at a regional level // Cybergeo – European journal of geography. Режим доступа: http://cybergeo.revues.org/16283
18. World Urbanization Prospects: The Revision of 2010. Режим доступа: http://esa.un.org/unup/

The application of the theory of fractals for the study of the fuzzy central place systems

P.P. Em

Since the middle of 1990s, the theory of fractals has become a methodological basis for a large number of foreign studies dealing with the territorial organization of population. This work attempts to apply the theory of fractals to the analysis of heterogeneous distribution of central functions in the fuzzy central places system in the case of the Capital agglomeration of the Republic of Korea.