

УДК 911.375.62 (460.356)

ГИС-МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗЕЛЕННОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА МАЛАГА

© 2021 г. Е.Е. Миронова

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический факультет
Россия, 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы
E-mail: eev.mironova@yandex.ru, liza.mironova@icloud.com*

Поступила в редакцию 16.09.2020. После доработки 01.10.2020. Принята к публикации 01.12.2020

В статье рассматриваются методические подходы к оценке пространственной конфигурации и структуры зеленых насаждений и фрагментов природного ландшафта (на примере города Малага, Испания). Применяются современные методы ГИС-моделирования для оценки зеленой инфраструктуры Малаги с точки зрения конфигурации, фрагментированности и пространственной структуры зеленых насаждений (при помощи программного обеспечения GuidosToolBox). Используемый метод морфологического пространственного анализа (MSPA-анализ) ориентируется на геометрию и связность компонентов на основе растрового изображения изучаемой территории, может автоматически идентифицировать экологические коридоры разного размера, а также в дальнейшем ранжировать их в пределах сети, тем самым позволяя оценить связность зеленого каркаса города.

Результатом MSPA-анализа является получение представления о конфигурации и структуре зеленых насаждений и выделение основных базовых резерватов (ядра) и островов зеленой инфраструктуры, экологических коридоров; проведена оценка связности и фрагментированности – критически значимых для определения единства экологического каркаса параметров. Выполненное исследование содержит научную новизну в разработанных методических подходах к определению приоритетных участков сети зеленой инфраструктуры, одновременно важных как для сохранения биоразнообразия, так и для развития рекреационно-эстетических качеств зеленых насаждений.

Ключевые слова: зеленая инфраструктура, урбанизированные экосистемы, ГИС-моделирование, связность, фрагментированность зеленых насаждений, MSPA-анализ.

DOI: 10.24411/1993-3916-2021-10149

Озеленение является одним из основных экологических способов оздоровления и благоустройства городской среды (Голубчиков, 2001). Поддержание зеленой инфраструктуры в качестве источника экосистемных услуг является ключевым направлением устойчивого развития городов (Wei et al., 2018). Тем не менее, единство экологического каркаса зачастую оказывается ограничено снижением связности зеленой инфраструктуры и высокой степенью фрагментированности зеленых насаждений (McNicoll, 2005). Поэтому важной задачей становится не только планирование внедрения новых зеленых насаждений и управление ими, но и последующий анализ их функциональных свойств.

Урбанизированные территории как таковые являются сложными и многообразными системами, и анализ их эволюции зачастую страдает из-за нехватки пространственных данных и недостаточного понимания влияния социально-экономических и физико-географических факторов. С учетом этих ограничений, Европейское Средиземноморье, непрестанно развивающееся за счет активного вовлечения туристических ресурсов, является одним из самых благоприятных регионов для проведения такого рода исследований.

Средиземноморский климат, сухой и жаркий, сильно влияет на необходимость обеспечивать город развитой зеленой инфраструктурой. Тень от зеленых насаждений помогает смягчить высокие температуры, а использование таких элементов, как, например, зеленые крыши, благоприятствует снижению энергопотребления для охлаждения помещений и повышению эстетического облика городов.

В основном, в научной литературе анализ принципа связности заключается в оценке способности

зеленой инфраструктуры сохранять местообитания животных и предоставлять видам возможность мигрировать (Liquete et al., 2015). Из-за этого многие научные работы на тему связности не имеют прямого отношения к городским системам. Скорее, они сфокусированы на анализе зеленой инфраструктуры пригородов крупных агломераций, или же сельских районов. Тем не менее, в контексте зеленой инфраструктуры идея связности так же важна, как и принцип её многофункциональности, то есть её способности осуществлять на любой территории множество различных функций (Hansen et al., 2014).

Настоящее исследование предлагает набор пространственных индикаторов, которые помогут оценить степень связности элементов городской зеленой инфраструктуры города Малага. Ландшафтная связность может быть рассчитана с использованием интегрального индекса связности (ИС) и вероятности связности (РС) – индикаторов, основанных на теории графов (Flynn, Traver, 2013). В качестве альтернативы может использоваться метод морфологического пространственного анализа (MSPA), который обеспечивает более гибкий подход к учету связности зеленой инфраструктуры. MSPA ориентируется на геометрию и связность компонентов на основе растрового изображения изучаемой территории, и может автоматически идентифицировать существующие экологические коридоры (Batty, Rana, 2002).

В качестве объекта исследования был избран город Малага (рис. 1), где стремительный рост населения, начиная с 1960-х годов, поставил ряд вопросов, касающихся эффективности городского планирования, включая сферу озеленения.

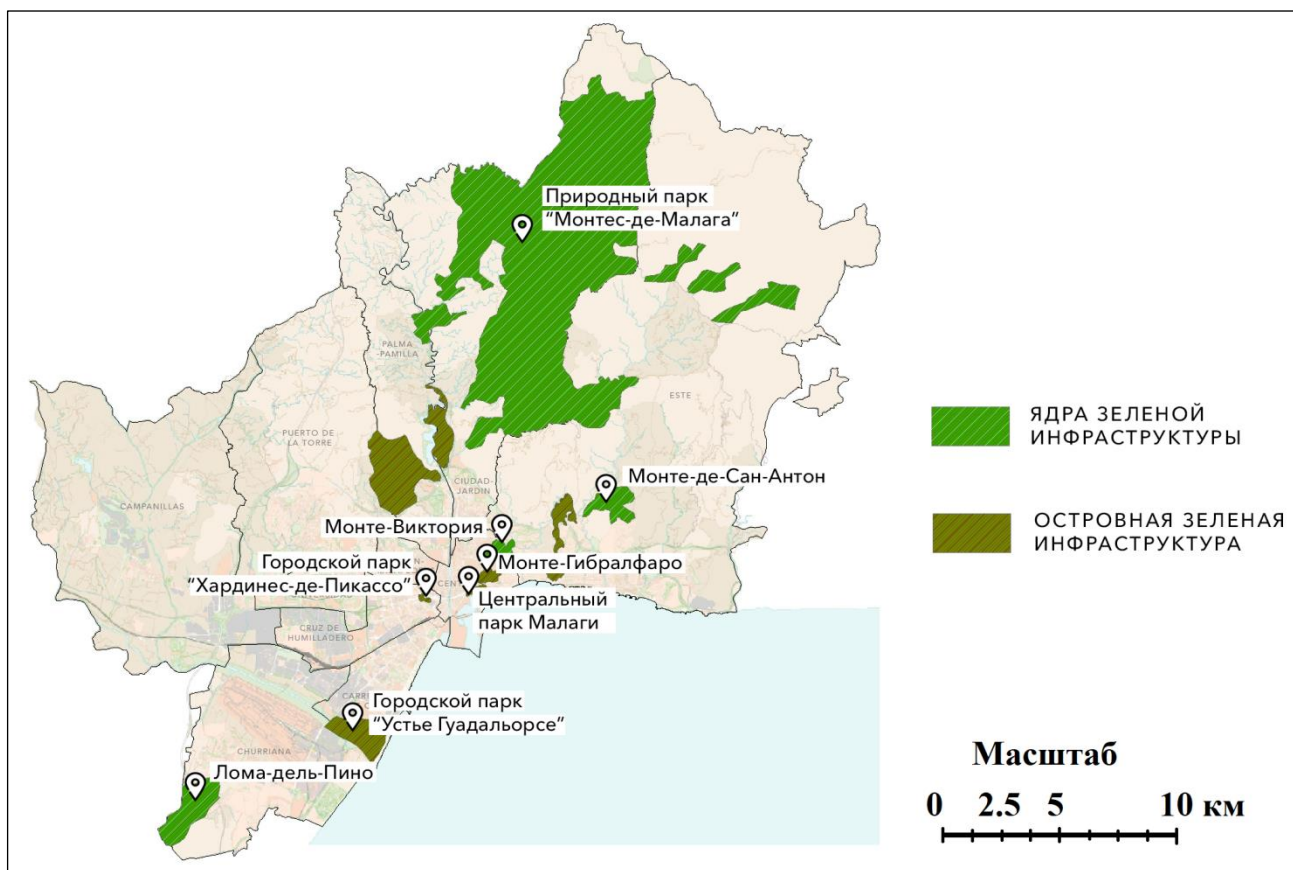


Рис. 1. Крупные элементы зеленой инфраструктуры г. Малага.

Основной целью этого исследования является оценка связности элементов зеленой инфраструктуры Малаги как одного из важнейших геоэкологических компонентов городской системы. В контексте работы были поставлены задачи применить новый методический подход к анализу структуры зеленых насаждений и фрагментов природного ландшафта в городе (морфологический пространственный анализ) и на основании построенной модели провести оценку

критически значимых параметров связности и фрагментированности зеленых насаждений.

Материалы и методы

Уникальной особенностью метода морфологического пространственного анализа (MSPA) является автоматическое обнаружение экологических коридоров разного масштаба между основными функциональными ядрами изображения, а также последующее ранжирование этих обнаруженных путей с учетом относительной важности каждого компонента – узла или коридора – в данной сети (Vogt, Riitters, 2017). Кроме того, метод MSPA требует только растровые данные о землепользовании региона и соответствующее программное обеспечение, то есть, метод чрезвычайно легок в применении.

Для извлечения элементов зеленой инфраструктуры Малаги было использовано некоммерческое программное обеспечение GuidosToolBox (The Graphical User Interface for the Description of Objects and their Shapes Toolbox). Все инструменты GuidosToolbox основаны на геометрических принципах и, следовательно, могут применяться в любом масштабе и для любых видов растровых данных. GTB использует для представления объектов землепользования в бинарном изображении, в котором пространственное положение каждого пикселя определяется кодом «1» или «0» (где «1» – передний план, то есть именно изучаемые элементы ландшафта, «0» – задний план). В данном случае, «1» представляет собой собственно зеленую инфраструктуру (передний план), а «0» – городскую застройку (задний план).

Результат анализа сильно зависит от параметра Edge Width. Увеличение Edge Width увеличивает область фона за счет основной области переднего плана, и, соответственно, может изменить класс MSPA. В данной работе параметр Edge Width равняется 4 пикселям.

Область переднего плана бинарного изображения разделена на семь общих классов MSPA: ядро (Core), остров (Islet), окно (Perforation), край (Edge), петля (Loop), коридор (Bridge) и ответвление (Branch; табл. 1). Эта сегментация приводит к взаимоисключающим классам, которые при слиянии точно соответствуют исходной области переднего плана. Область заднего плана изображения подразделяется на три класса: фон (Background), просвет окна (Core Opening) и окаймление (Border Opening).

Таблица 1. Классы переднего и заднего планов и их пространственное значение.

Класс	Пространственное значение
Ядро (Core)	Пиксели зеленой инфраструктуры, окруженные со всех сторон также пикселями переднего плана на расстояние, превышающее указанное.
Остров (Islet)	Пиксели зеленой инфраструктуры, не окружающие ядро. Это единственный не связанный класс.
Окно (Perforation)	Пиксели зеленой инфраструктуры, формирующие переходную зону между передним планом и фоном для внутренних областей.
Край (Edge)	Пиксели зеленой инфраструктуры, формирующие переходную зону между передним планом и фоном для внешних областей.
Коридор (Bridge)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые соединяют два или более непересекающихся ядра.
Петля (Loop)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые соединяют область ядра с самой собой.
Ответвление (Branch)	Пиксели зеленой инфраструктуры, которые тянутся от области ядра, но не соединяются с другой областью ядра.
Просвет окна (Core Opening)	Пиксели заднего плана, формирующие внутреннюю зону отверстия.
Окаймление (Border Opening)	Пиксели заднего плана, формирующие переходную зону между краем и фоном.
Фон (Background)	Пиксели заднего плана, окруженные со всех сторон также пикселями заднего плана на расстояние, превышающее указанное.

MSPA-анализ ориентирован на выявление важнейших показателей экологического состояния среды (в данном случае – городской), и с его помощью можно решать целый спектр различных проблем, касающихся управления и сохранения экосистем. Метод применим в различных сферах, связанных с оптимизацией городской среды и генеральным планированием городов, и его использование делает возможной оценку изменений состояния экосистем, получение более чёткого представления о существующих геоэкологических проблемах и путях их решения; пространственный анализ предоставляет информацию, необходимую для определения приоритетов дальнейших исследований.

Инструменты Contagion и Entropy, принадлежащие к группе инструментов Fragmentation, помогают определить степень фрагментации ареалов зелёной инфраструктуры города. Инструменты имеют важное различие: в то время как оценка фрагментации на основе энтропии (Entropy) основана на одновременной оценке переднего плана и фона (как единое целое), параметр сцепленности (Contagion) основан на рассмотрении только объектов переднего плана (Vogt, 2015). Соответственно, для анализа зелёной инфраструктуры изолированно от анализа всей городской системы использовался инструмент Contagion, сосредотачивающийся исключительно на объектах переднего плана.

Фрагментация выражается в виде процентной шкалы, где показатели, стремящиеся к 0%, указывают на минимальную степень фрагментации ареала, тогда как стремящиеся к 100% характерны для ареалов с максимальной фрагментацией.

Не менее полезным подходом к изучению фрагментации зелёной инфраструктуры является инструмент FAD (Foreground Area Density). FAD-анализ проводится путем измерения показателя плотности пикселей переднего плана по пяти шкалам наблюдения (с использованием метода moving window analysis) с квадратными соседними участками длиной в 7, 13, 27, 81, 243 пикселя (Riitters et al., 2012). Результатом проведенного анализа служит набор карт с разными результатами для каждого выбранного масштаба наблюдения. Значения FAD отображаются цветовым кодированием по следующим классам единства инфраструктуры: редкий (Rare), прерывистый (Patchy), переходный (Transitional), господствующий (Dominant), существенный (Interior), цельный (Intact).

Результаты и обсуждение

По результатам морфологического пространственного анализа территория города была поделена на ареалы, относящиеся к каждому из 10 пространственных классов (рис. 2).

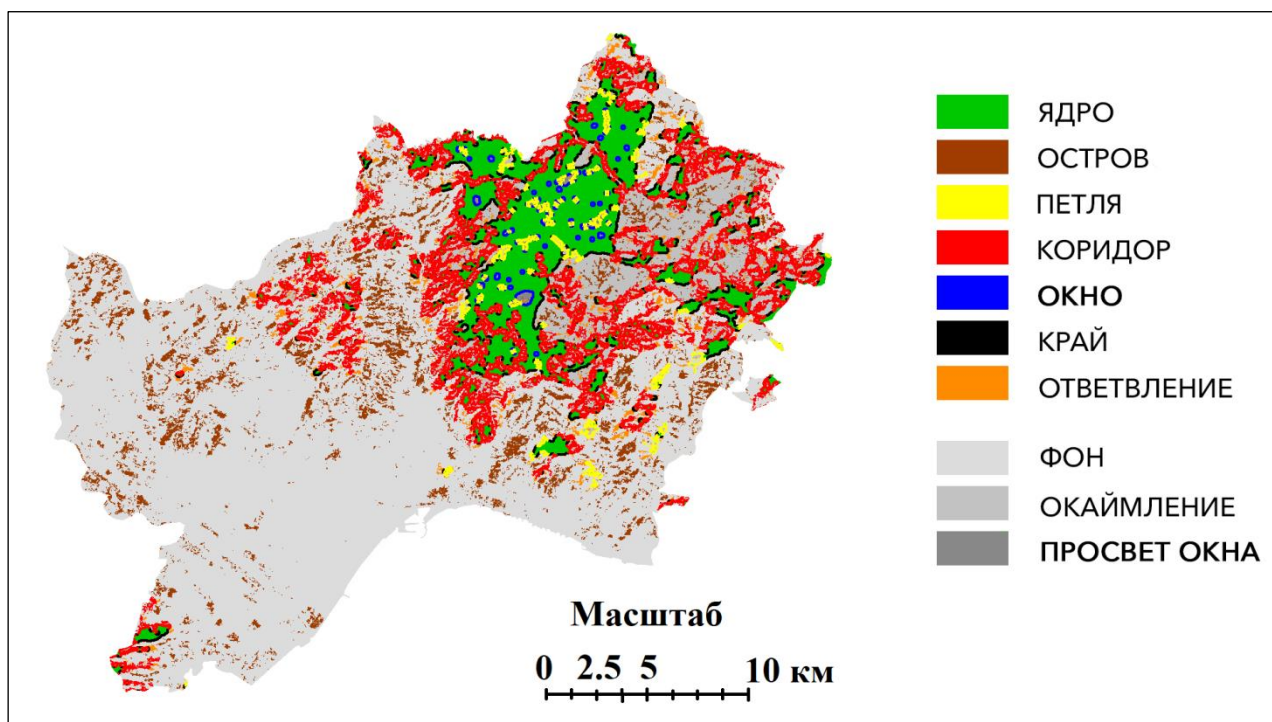


Рис. 2. Результаты MSPA-анализа для территории города Малага.

Ядра представляют собой крупные базовые резерваты, наиболее связанные между собой. В Малаге ядрами системы зеленой инфраструктуры в первую очередь являются Природный парк Монтес-де-Малага, занимающий большую часть северо-восточного района Сьюдад-Хардин, парк Лома-дель-Пино («Сосновый холм») на юго-западе района Чурриана, парк «Монте-де-Сан-Антон» в районе Эсте, лесной парк «Монте-Виктория» в центре города. В общей сложности ядра зеленой инфраструктуры занимают около 9% территории города, составляя 34.1 км² (рис. 3).

Ядра представляют собой крупные базовые резерваты, наиболее связанные между собой. В Малаге ядрами системы зеленой инфраструктуры в первую очередь являются Природный парк Монтес-де-Малага, занимающий большую часть северо-восточного района Сьюдад-Хардин, парк Лома-дель-Пино («Сосновый холм») на юго-западе района Чурриана, парк «Монте-де-Сан-Антон» в районе Эсте, лесной парк «Монте-Виктория» в центре города. В общей сложности ядра зеленой инфраструктуры занимают около 9% территории города, составляя 34.1 км² (рис. 3).

Островная зеленая инфраструктура занимает меньшие площади (27.5 км²), при этом имея намного большую пространственную фрагментацию. К крупным островкам зеленой инфраструктуры относятся: парк устья р. Гуадальорсе, естественная растительность вдоль течения р. Кампанийяс, парк «Монте-де-Гибралфаро», а также значительная часть районов Пуэрто-де-ла-Торре, Эсте и Кампанийяс. В центре города островная зеленая инфраструктура включает в себя уличный парк Хардинес-де-Пикассо («Сады Пикассо») и Центральный парк Малаги, являющийся одной из главных достопримечательностей города. Однако, несмотря на близкое расположение этих зеленых насаждений друг к другу, сильная фрагментация зеленой инфраструктуры в центральной части города не позволяет говорить о связности. Почти все крупные элементы зеленой инфраструктуры в пределах городского ядра являются островными – это городские парки и скверы, сады и площадки для отдыха и рекреации.

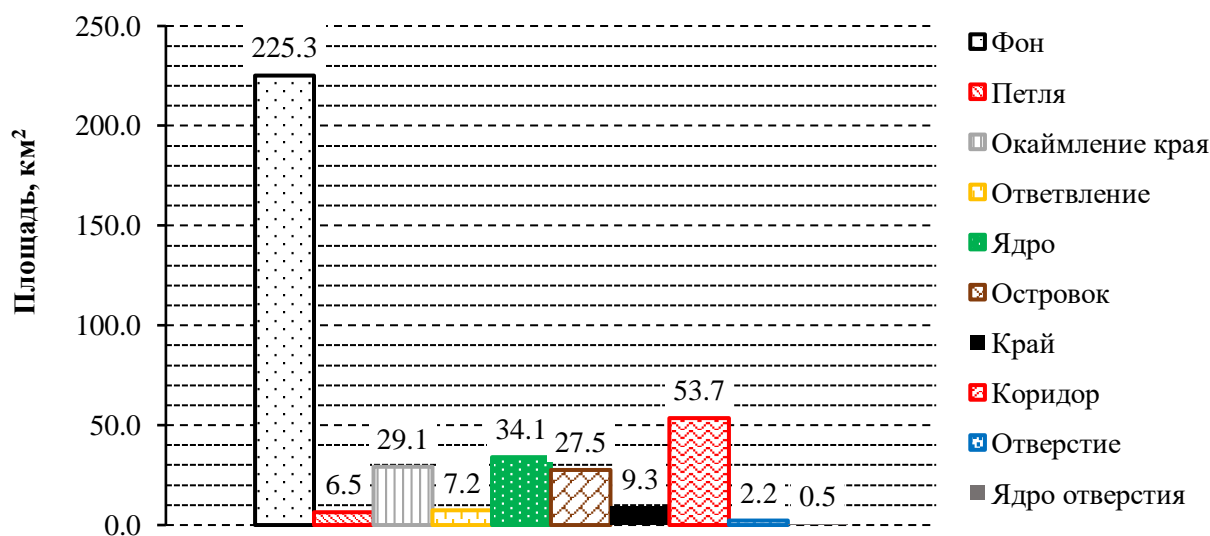


Рис. 3. Общая площадь каждого класса по результатам MSPA-анализа.

Значительная часть города покрыта «коридорами» – участками растительности, которые соединяют непересекающиеся ядра зеленой инфраструктуры между собой. Общая площадь таких коридоров составляет почти 53.7 км² и превышает площадь самих ядер. Самую большую территорию коридоры занимают в районе Эсте. Также большие площади растительности данного класса произрастают в районах Пальма-Памийя и Пуэрто-де-ла-Торре.

В целом, наибольшее внимание в исследовании связности городской зеленой инфраструктуры должно уделяться ядрам и коридорам; остальные элементы по большей части не способствуют увеличению или уменьшению структурной связности системы.

В случае Малаги, минимальной фрагментацией (инструмент Contagion) характеризуются в

первую очередь ядра, где степень фрагментации не превышает 15% (рис. 4). Существенная часть ареалов характеризуется средней степенью фрагментации – в пределах 30-60%; это зеленая инфраструктура районов Пуэрто-де-ла-Торре, Кампанийяс и Палма-Памийя. Интересно, что, несмотря на небольшую площадь и разбросанность по территории, зеленая инфраструктура в центральном районе города также характеризуется средней степенью фрагментации, менее 50%. Наиболее «разорвана» зеленая инфраструктура в районе Чурриана, где большая часть зеленых насаждений является островной, и, следовательно, фрагментированной с показателем в 80% и более.

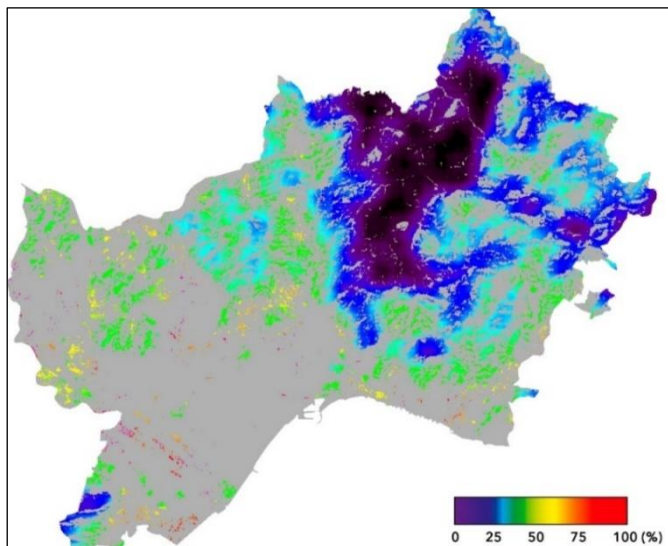


Рис. 4. Фрагментация зеленой инфраструктуры Малаги (инструмент Contagion).

минимально детальной шкале (7 пикселей) наблюдения показал, что 29% зеленой инфраструктуры являются целостными и нетронутыми, а 18.2% и 28.8% относятся к классам существенного и господствующего единства инфраструктуры (рис. 5). Фрагментированная растительность составляет около 23.8% территорий переднего плана (где переходный класс занимает 13.7%, прерывистый – 9.4%, а редкий – 0.7%).

Главное отличие результатов по наиболее детальной шкале наблюдения (243 пикселя) – это полное отсутствие класса цельной растительности.

Более того, класс существенной целостности занимает менее 1% территории, а наименее фрагментированные участки (Монтес-де-Малага и местность рядом с небольшим поселением Эспартерос на восточной окраине города) принадлежат к классу господствующей целостности и занимают 43.2% переднего плана. Около 1.3% занимают максимально фрагментированные участки зеленой инфраструктуры в районах Чурриана, Пуэрто-де-ла-Торре и Сентро. Второй по обширности, прерывистый класс занимает 31.7% территории; стоит отметить, что из крупных, туристически привлекательных островков зеленой инфраструктуры к этому классу относятся парки Монте-Виктория, Монте-де-Гибралфаро и Монте-де-Сан-Антон. Оставшаяся часть переднего плана (около 23%) приходится на переходный класс.

Выводы

Метод пространственного морфологического анализа применительно к оценке связности элементов зеленой инфраструктуры г. Малаги дал однозначные результаты. Было выделено около 5-6 крупных ядер зеленой инфраструктуры внутри сети зеленых насаждений. Лишь эти немногочисленные ядра соединены между собой коридорами и имеют петли, благоприятствующие миграциям животных. Несмотря на относительно высокие коэффициенты обеспеченности населения зеленой инфраструктурой и обширные площади насаждений (согласно нормативным документам

Зеленая инфраструктура в Малаге (включая сосновые и дубовые массивы, сельскохозяйственные угодья, водно-болотные угодья устья Гуадальорсе и т.д.) была сильно фрагментирована в первую очередь активным расширением плотной жилой застройки по северо-западному лучу в течение последних нескольких десятилетий. Это расширение территории оказывает огромное давление на биоразнообразие региона в связи с уменьшением связи между становящимися все более и более изолированными участками зеленой инфраструктуры.

FAD-анализ на разных шкалах наблюдения представляет интерес, так как зачастую могут быть получены если не диаметрально противоположные, то крайне различные результаты.

Анализ территории Малаги на

градостроительного проекта Agenda Urbana Málaga), большая часть зеленых насаждений имеет островной (фрагментарный) характер и низкий параметр связности элементов зеленой инфраструктуры, что не способствует созданию единой сети и экологического каркаса как такового.

ГИС является ключевым инструментом, при помощи которого можно как направлять внимание на отдельные особенности ландшафта, так и исследовать их в совокупности. Метод морфологического пространственного анализа имеет определенные ограничения, в первую очередь связанные с определением масштаба входных данных, так как разные ландшафтно-экологические проекты требуют различной детальности изучения. От пользователя требуется понимание того, какой масштаб подходит для конкретного применения MSPA-метода. Результаты оценки пространственно-зависимых параметров сцепленности и фрагментации могут также зависеть не только от уровня, на котором проводится анализ, но и от экологических процессов, анализируемых в рамках ландшафтной матрицы. Также заметным ограничением является невозможность дифференциации зеленой инфраструктуры по морфометрическим показателям (параметрам высоты и уклона местности), принадлежности к сетке элементарных водосборов и прочим пространственным характеристикам в трёхмерной системе координат реального пространства.

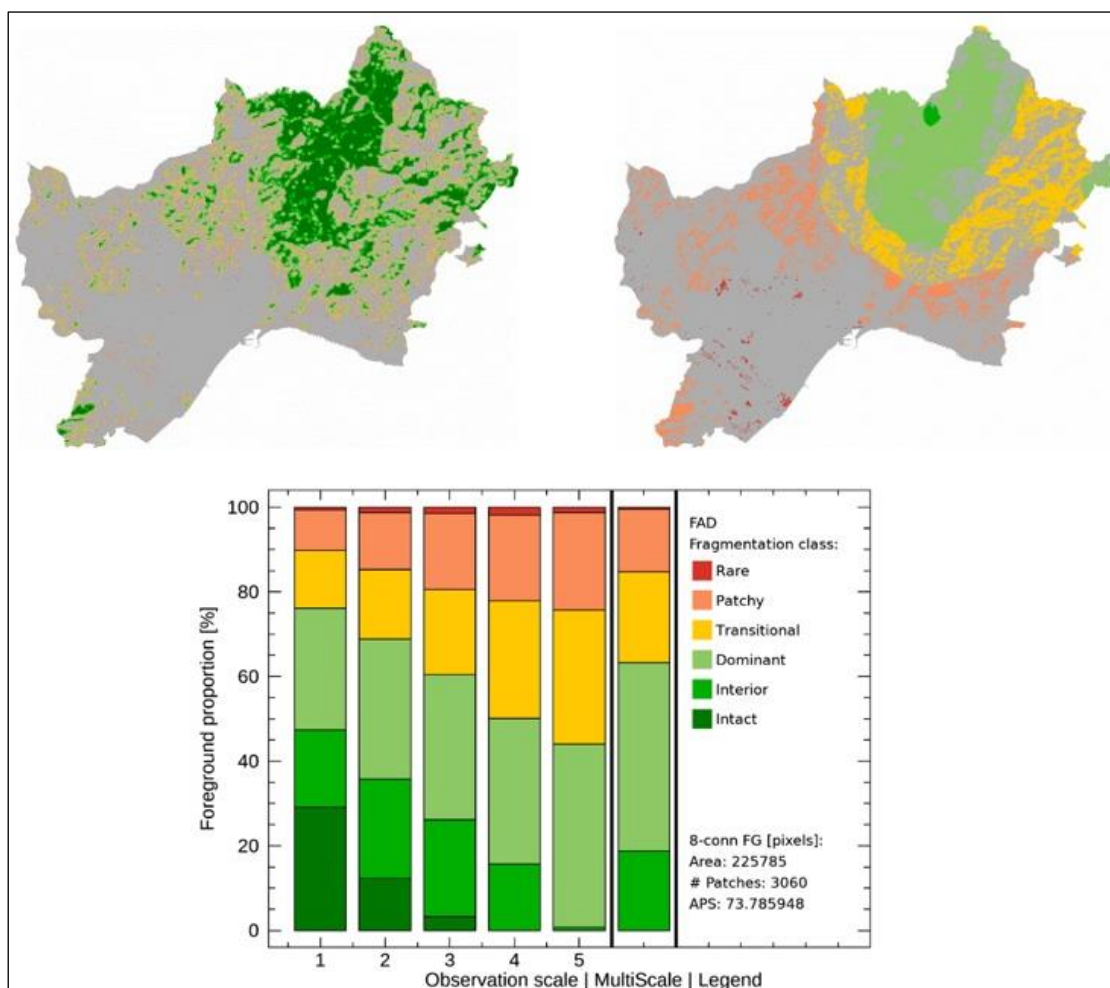


Рис. 5. FAD-анализ (Foreground Area Density) зеленой инфраструктуры Малаги по наименее (1, слева) и наиболее (5, справа) детальным шкалам наблюдения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Голубчиков С.Н., Минин А.А., Гутников В.А. 2001. Пути оптимизации городской среды // Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие. Пасья М. 192 с.

- Agenda Urbana Málaga. Indicadores de Sostenibilidad 2016. Territorio y configuración de la ciudad [Электронный ресурс http://static.omau-malaga.com/omau/subidas/archivos/6/2/arc_7726_v2.pdf (дата обращения 14.04.2020)].
- Batty M., Rana S. 2002. Reformulating Space Syntax: The Automatic Definition and Generation of Axial Lines and Axial Maps. Centre for Advanced Spatial Analysis Working Paper 58; Centre for Advanced Spatial Analysis University College London: London, UK. 42 p.
- Flynn K.M., Traver R.G. 2013. Green infrastructure life cycle assessment: A bio-infiltration case study // *Ecological Engineering*. No. 55. P. 9-22.
- Hansen R., Pauleit S. 2014. From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas // *Ambio*. Vol. 43 (4). P. 516-529.
- Liquete C., Kleeschulte S., Dige G., Maes J., Grizzetti B., Olah B., Zulian G. 2015. Mapping green infrastructure based on ecosystem services and ecological networks: A Pan-European case study // *Environmental Science & Policy*. No. 54. P. 268-280.
- McNicol G. 2005. United Nations. Department of Economic and Social Affairs: World Economic and Social Survey 2004: International Migration // *Population and Development Review*. No. 31. P. 183-185.
- Riitters K.H., Coulston J.W., Wickham J.D. 2012. Fragmentation of forest communities in the eastern United States // *Forest Ecology and Management*. No. 263. P. 85-93.
- Vogt P., Riitters K. 2017. GuidosToolbox: universal digital image object analysis // *European Journal of Remote Sensing*. No. 50. P. 352-361.
- Vogt P. 2015. Quantifying landscape fragmentation. XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. João Pessoa-PB, Brasil. P. 1239-1246.
- Wei J., Qian J., Tao Y., Hu F., Ou W. 2018. Evaluating Spatial Priority of Urban Green Infrastructure for Urban Sustainability in Areas of Rapid Urbanization: A Case Study of Pukou in China // *Sustainability*. No. 10. P. 327.