

Применение геоинформационного моделирования и фрактального анализа при геоэкологической оценке урбогеосистем

© 2023. Б. И. Кочуров, д. г. н., профессор, в. н. с.,
М. А. Мовчан, аспирант,
Институт географии РАН,
119017, Россия, г. Москва, Старомонетный переулок, д. 29,
e-mail: camertonmagazin@mail.ru

В статье апробируются современные методы геоэкологической оценки населённых пунктов, а именно ГИС-моделирование и фрактальный анализ. В последнее время они нашли широкое применение при количественной оценке как инфраструктурных компонентов городской среды – улично-дорожной сети, плотности застройки, степени транспортной доступности, так и средоформирующих, в роли которых выступают зелёные зоны. Методы ГИС-моделирования позволяют количественно оценить плотность распределения определённого компонента городской среды или рассчитать степень доступности в виде классификации и визуализировать результаты в пространственно-временном масштабе в удобном для восприятия виде. В работе оцениваются параметры густоты дорожной сети, плотности застройки и степень озеленения территории по спектральным индексам – NDVI и NDBI. При фрактальном анализе оценивается диапазон устойчивости среды населённых пунктов к факторам антропогенной нагрузки и, таким образом, выявляются ареалы с различной степенью выраженности техногенного воздействия по показателю фрактальной размерности – Df. Методы геоинформационного моделирования и фрактального анализа дополняют друг друга при геоэкологической оценке и позволяют давать более объективную оценку состояния городской территории.

Ключевые слова: геоинформационное моделирование, урбогеосистемы, фракталы, геоэкологическая оценка, устойчивое развитие, городская инфраструктура.

Application of geoinformation modeling and fractal analysis in the geoecological assessment of urban geosystems

© 2023. B. I. Kochurov ORCID: 0000-0002-8351-3658, M. A. Movchan ORCID: 0009-0003-5741-941X,
Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences,
29, Staromonetny Pereulok, Moscow, Russia, 119017,
e-mail: camertonmagazin@mail.ru

The article tests modern methods of geo-ecological assessment of settlements, namely GIS modeling and fractal analysis. Recently, they have found wide application in quantifying both the infrastructural components of the urban environment – the street and road network, the density of buildings, the degree of transport accessibility, and the environment-forming ones, such as green zones. GIS modeling methods allow quantifying the distribution density of a certain component of the urban environment or calculating the degree of accessibility in the form of classification and visualizing the results on a spatiotemporal scale in a form convenient for perception. The paper evaluates the parameters of the density of the road network, the density of buildings and the degree of landscaping of the territory according to spectral indices – NDVI and NDBI. Fractal analysis evaluates the range of sustainability of the environment of settlements to factors of anthropogenic load and, thus, areas with varying degrees of severity of anthropogenic impact are identified by the indicator of fractal dimension. The methods of geoinformation modeling and fractal analysis complement each other in geoecological assessment and allow for a more objective assessment of the state of the urban area.

Keywords: geoinformation modeling, urban geosystems, fractals, geo-ecological assessment, sustainable development, accessibility.

Методы моделирования набирают всё большую популярность в геоэкологических исследованиях в системе природа–общество и нашли широкое применение в геоэкологической оценке урбанизированных территорий. Основными методическими подходами явля-

ются картографическое [1, 2] и математико-статистическое моделирование, в том числе с использованием приёмов ГИС-технологий [1, 3] и фрактального анализа [3–5]. На сегодняшний день, научных работ, в которых бы подробно освещалась методика моделирования при проведении геоэкологической оценки городов, крайне недостаточно [1, 4–7]. Применительно к изучаемой территории таких работ вовсе нет, вместе с тем, за последние 5–10 лет в Московской области, степень урбанизированности территории начинает приобретать трудно контролируемый характер, особенно в сфере размещения населения, градостроительства и развития транспортной сети, что влечёт за собой чрезмерное влияние антропогенных факторов на развитие урбогеосистемы, а также подавление роли других компонентов городской системы, например, озеленённых территорий [8].

Традиционных методов, таких как оценка уровня загрязнений, в том числе экологических рисков, связанных с загрязнением сред, вычисление эколого-хозяйственного баланса и применение разного рода индексов качества городской среды, недостаточно, поскольку они не в полной мере отражают изменения в градостроительстве и не учитывают степень развития антропогенных процессов, плотности их распределения в пространственно-временном поле, что не позволяет прогнозировать тенденции изменения состояния городских ландшафтов.

Моделирование с использованием ГИС-технологий, а именно, вычисление транспортной доступности, расчёт плотности улично-дорожной сети и застройки, классификация ландшафтов по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ); а также расчёт фрактальной размерности позволяют решить обозначенные выше проблемы и, в значительной мере, оценить развитие городских территорий относительно их степени развитости и устойчивости.

Основой для выполнения исследования послужили работы в области геоэкологической оценки [1, 11, 12], применения индексов загрязнения воздушной и водной сред [1] и качества городской среды [13]; а также использования методов фрактального моделирования инфраструктуры города [1, 4, 9, 11]. Методы геоэкологической оценки являются основой для моделирования. В частности, в работах [2, 12, 14] приводятся подходы к геоэкологическому картографированию, детально описывается методика проведения геоэкологических оценок на примере г. Москвы. Но при этом

практически не учитывается инфраструктура и элементы градостроительной структуры, выступающие как факторы антропогенной нагрузки на городской ландшафт. Работы, в которых используются индексы загрязнения и показатели качества городской среды, ориентированы в основном на интегральную оценку загрязнения сред. Оценивание качества городской среды выражается в соотношении площадей естественных и изменённых ландшафтов и/или суммировании элементов антропогенной нагрузки, а вся процедура оценок носит рейтинговый характер. Однако, в последние годы, выделяются работы [1, 4, 5, 9, 15–18], в том числе зарубежные [6, 7], максимально приближенные к проблематике темы и посвящённые оценке транспортной сети и степени застройки территории, как факторов антропогенной нагрузки. В них широко представлены модельные и геоинформационные методы, но оценивание производится без конкретной привязки к структуре городского ландшафта.

Цель работы – изучение возможностей моделирования городских ландшафтов, инфраструктуры и других градостроительных компонентов города Видное при помощи геоинформационных систем и фрактального анализа.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования служит урбогеосистема г. Видное. Материалами для написания научной работы послужили статистические данные, включающие характеристику города; генеральный план городской части. Также были задействованы космические снимки территории за 2021–2022 гг. спутников Sentinel, материалы открытых данных (OSM – open street map – слои улично-дорожной сети, зданий и иных сооружений). Подготовка слоёв, географический анализ и классификация, а также оценка плотности транспортной сети, застройки и моделирование доступности производились в программных средах QGIS; а вычисление фрактальной размерности (послойно) в Gwyddion.

Применение ДЗЗ съёмки для дифференциации естественных и антропогенных ландшафтов и их картографирование. На первом этапе проводили скачивание снимков спутника Sentinel-2 в видимом, ближнем и среднем инфракрасном диапазонах, а также изображения с классами земель. Затем загружали их в среду QGIS и вычисляли индексы растительности и различий застройки. Следующий этап включал в себя наложение класси-

фикационной карты; подборку цветовых шкал и создание легенды, определение площадей каждой категории земель и перевод в процентный формат с помощью пропорционального соотношения. Нормализованные разностные индексы вегетации и различия застройки вычисляли по формулам [15]:

$$\begin{aligned} NDVI &= (NIR - RED) / (NIR + RED), \quad (1) \\ NDBI &= (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR), \quad (2) \end{aligned}$$

где *NIR* – ближний инфракрасный диапазон (канал) с длиной волны 763–908 нм; *RED* – видимый красный с длиной волны 683–731 нм; *SWIR* – средний инфракрасный канал в диапазоне 1542–1685 нм.

Вычисление плотностей улично-дорожной сети (УДС) и застройки проводили средствами геоинформационных систем и цифровых моделей при помощи построения сетки 400 × 400 м, подсчёта точек в полигонах, суммы длин и количества дорог на единицу площади ячеек. Расчёт транспортной доступности осуществляли путём выборки главных (осевых) дорог населённого пункта, внесения информации о типе дорог, разрешённой скорости и расстояния в таблицу атрибутов. Затем создавали поле «время», по которому и производили расчёты доступности. Далее при помощи модуля способом линейной интерполяции проводили оценку транспортной доступности (в минутах).

Фрактальный анализ градостроительного и инфраструктурного компонента. Этот этап работ включал в себя: построение сетки с размером ячеек 400 на 400 м, наложение слоёв с УДС и зданиями (по отдельности); вычленение каждого квадрата с элементами средствами обработки изображений. Далее производили подсчёт размерности ячеек в среде Gwyddion методами **Box-counting (кубический)** и **Portioning**. Затем из полученных значений вычитали число 1,5 для того, чтобы приравнять результаты к «фракталам на плоскости», поскольку алгоритм методом кубов вычисляет фрактальную размерность для трёх сторон изображения. Результаты заносили в таблицу атрибутов слоя ячейки и визуализировали в числовом формате в виде заливки в программе QGIS. Формула, по которой производили расчёты фрактальной размерности, следующая [17]:

$$Df = \log N / \log (1/r), \quad (3)$$

где *Df* – фрактальная размерность, *1/r* – регулирующий коэффициент (например, если

предыдущая клетка делится на 36 клеток, то *r* = 6), *N* – количество заполненных квадратов в конкретном масштабе, т. е. если, например, элементы транспортной сети имеются в 20 квадратах из 20, то *Df* = 2.

В полном виде алгоритм проведения исследований представлен в таблице.

Результаты и обсуждение

По результатам обработки данных ДЗЗ и цифровых моделей городской инфраструктуры был составлен ряд тематических карт. При анализе ландшафтной структуры и растительного покрова г. Видное было выявлено, что участки со значениями индекса NDVI более 0,68 соответствуют древесной растительности; травянисто-кустарниковый покров принимает значения от 0,35 до 0,68; открытая почва или асфальт имеют 0,03–0,35 ед. По другому индексу (NDBI) значения от -0,5 и менее соответствуют водным объектам и влажной почве; -0,12 – другие «запечатанные» пространства; 0,26 – покрытие крыш зданий.

По каждому показателю, а именно: древесная растительность, травянисто-кустарниковый покров, открытая почва и искусственные покрытия был рассчитан вклад в процентах от площади исследуемой территории. Результаты свидетельствуют о том, что наибольшую территорию в городском ландшафте занимают земли с древесным и травянистым покровом, составляя 60%. Второе место занимают искусственные покрытия (асфальтобетон, техногенные грунты и др.), особенно в юго-восточном направлении. Относительно высокий вклад зелёных зон в городе связан с широким распространением парков и озелённых и благоустроенных дворов с относительно удовлетворительным состоянием растительности. Центральная, западная и восточная части города озеленены в большей степени, с процентным вкладом порядка 70–80%, что совпадает с ранее полученными результатами [16]. Средний же показатель зелёных покрытий по населённому пункту составляет порядка 55%.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно хорошем озеленении большей части города и о высокой степени распространённости растительного покрова, особенно в виде парков-скверов и лесопарков, но в то же время, новые микрорайоны (юго-восточная, северная части), испытывают недостаток в озеленении (рис. 1, см. цв. вкладку I).

Средствами программы QGIS была оценена автотранспортная доступность и эколо-

Б. И. Кочуров, М. А. Мовчан
«Применение геоинформационного моделирования
и фрактального анализа при геоэкологической оценке
урбогеосистем». С. 32.

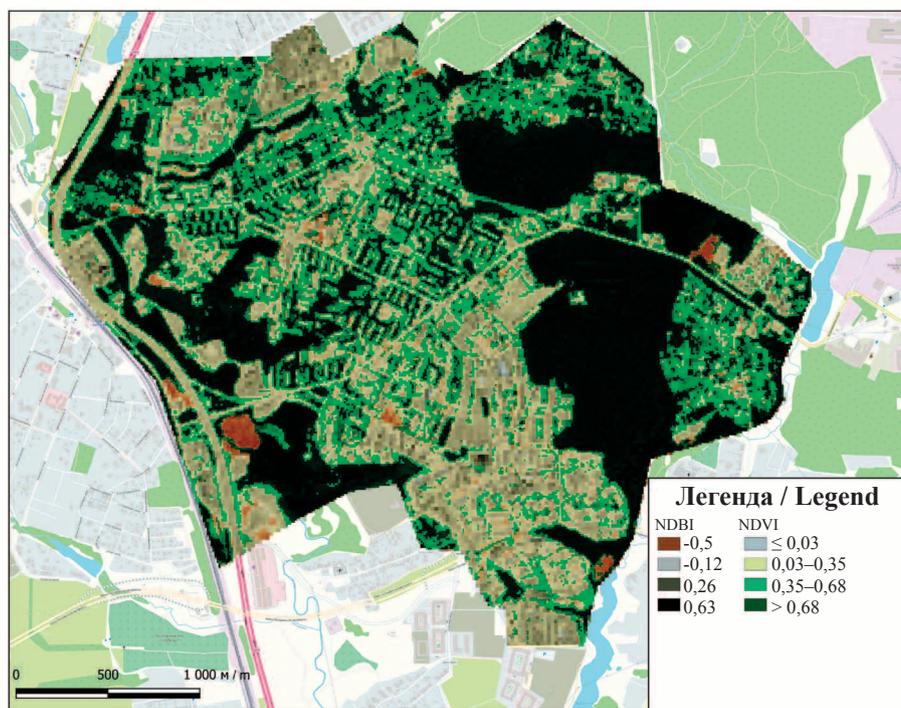


Рис. 1. Ландшафтная карта на основе комбинированных данных ДЗЗ (классификации спектральных индексов – различий застройки NDBI и вегетационного индекса NDVI). Масштаб 1 : 32000

Fig. 1. Landscape map based on combined data of remote sensing (classification of spectral indices – different of building NDBI and vegetation index NDVI). 1 : 32000

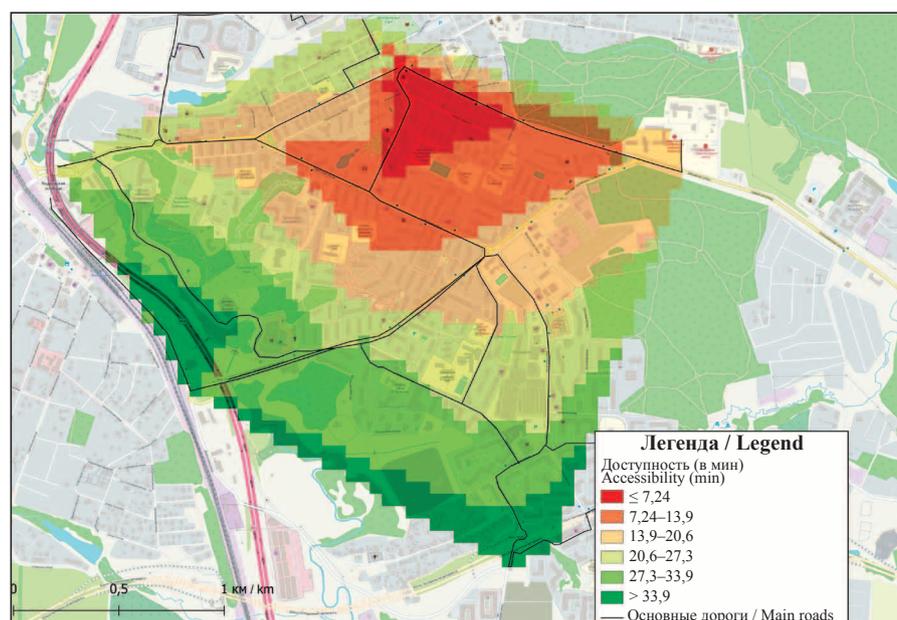


Рис. 2. Карта моделирования автотранспортной доступности по основным маршрутам (по времени) г. Видное. Масштаб 1 : 32000

Fig. 2. Transport accessibility simulation map along the main routes (by time) in Vidnoye city. 1 : 32000

Б. И. Кочуров, М. А. Мовчан
«Применение геоинформационного моделирования и фрактального анализа при геоэкологической оценке урбогеосистем». С. 32.

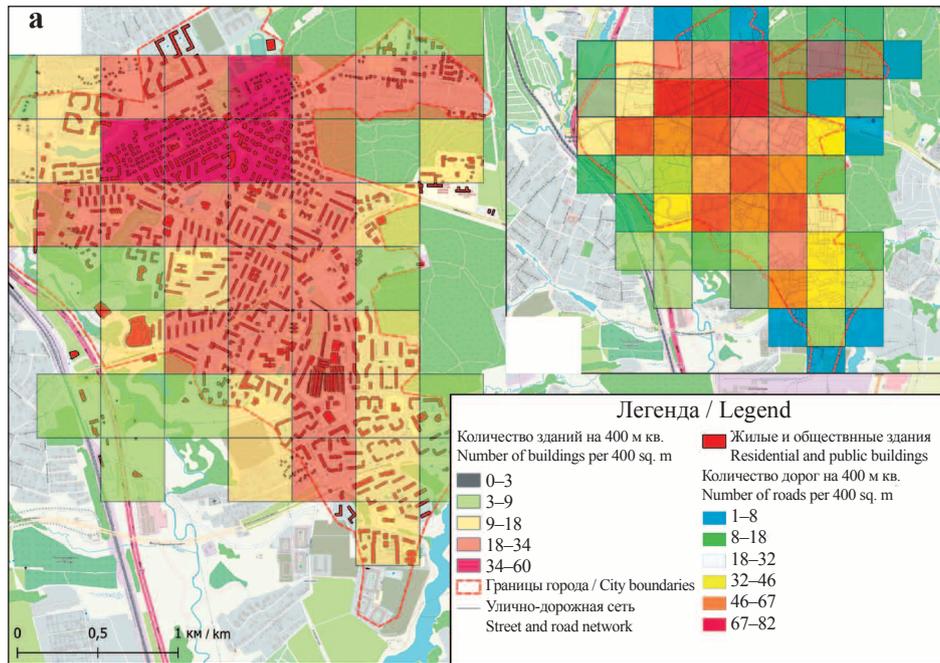


Рис. 3. Карты плотности улично-дорожной сети (а) и застройки территории (б). Масштаб 1 : 36000
Fig. 3. Map of road network (a) and building density (b). 1 : 36000

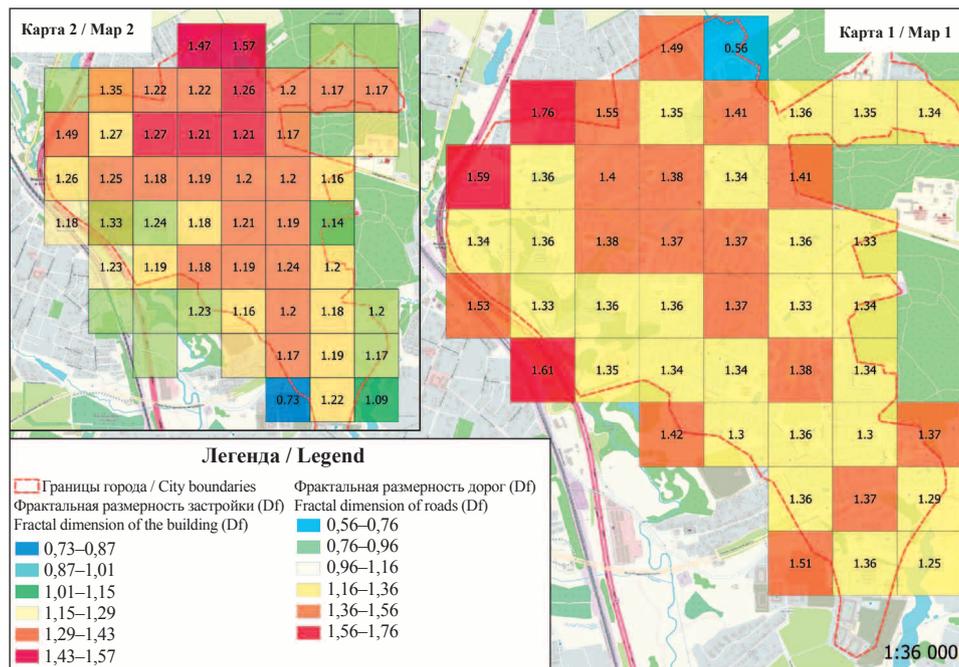


Рис. 4. Картосхемы моделирования фрактальной размерности транспортной инфраструктуры (1) и градостроительного компонента (2)
Fig. 4. Schematic maps of modeling fractal dimension of transport infrastructure (1) and urban planning component (2)

Общий алгоритм проведения моделирования
General algorithm conducting of modeling

Этапы / Stage	Содержание / Content	Результаты / Results
1. Подготовительный Preparatory	применение ДЗЗ съёмки для дифференциации естественных и антропогенных ландшафтов the use of remote sensing for the differentiation of natural and anthropogenic landscapes	подготовка мультиспектральных космоснимков, линейных и площадных слоёв preparation of multispectral space images, linear and areal layers
2. Основной Basic	расчёт процентного покрытия calculation of coverage percentage	построение картодиаграмм constructing cartodiagrams
	вычисление плотностей УДС и застройки calculation of road network and building density	подготовка картографического материала preparation of mapping material
	расчёт транспортной доступности calculation of transport accessibility	
	фрактальный анализ градостроительного и инфраструктурного компонента fractal analysis of urban planning and infrastructure component	подготовка таблиц и картографического материала preparation of tables and mapping material
3. Заключительный Final	сравнение и прогноз comparison and forecast	построение гистограмм и концептуальные прогнозы histogram construction and conceptual forecasts

гическая роль дорожно-транспортной сети. По транспортной доступности округа были выделены 6 классов (зон) на основании моделирования (рис. 2, см. цв. вкладку I). Затем в этой же программе рассчитывали процент площади для каждой зоны доступности. По полученным результатам выявлено, что наиболее доступные районы (пройденное расстояние занимает менее 7 мин и от 7 до 14 мин) – это центральная часть населённого пункта (в административном плане) и юго-восточная периферия. По предварительным расчётам площади этих зон составляют приблизительно 30–35%. Среднюю доступность имеет большая часть города (35–40%). Наименее доступными территориями являются южная и юго-западная периферия города, наиболее удалённые от центра г. Видное.

В целом, г. Видное является весьма доступным в отношении общественного транспорта, средний показатель составляет около 20 мин. Это говорит о компактности городской части и хорошей связанности районов. Низкая доступность южной периферии города обусловлена недостаточностью развития дорожно-транспортной сети из-за сравнительно недавней застройки этой территории.

Особое внимание в исследовании было уделено показателям плотности городской инфраструктуры и застройки с делением на 6 и 5 классов соответственно по количеству

дорог и зданий на единицу площади ячейки (400 м) средствами геоинформационного анализа. Расчёты плотностей улично-дорожной сети и застройки показали, что максимальная и близкая к максимальной плотность дорожной сети и, соответственно, высокая антропогенная нагрузка соответствует центральной и отчасти юго-западной части городской территории. Низкую плотность дорожной сети и, следовательно, слабую антропогенную нагрузку имеют периферийные районы г. Видное. Анализируя степень застроенности территории, стоит отметить, что наблюдается увеличение плотности застройки при движении к северу; эта закономерность прослеживается также по оси север-юг (рис. 3, см. цв. вкладку II).

Результаты оценки плотности параметров городской инфраструктуры сравнивали с данными, полученными с использованием геоинформационных технологий, что позволило провести дополнительную оценку фрактальной размерности транспортной инфраструктуры и городской застройки (рис. 4, см. цв. вкладку II). Относительно нагрузки УДС на городской ландшафт (рис. 4, карта 1) выполненные расчёты показали, что «зонами относительного риска» является западная периферия города со значениями Df от 1,59 до 1,76, что свидетельствует об избытке или чрезмерной нагрузке на городской ландшафт,

а также о неравномерном распределении транспортной сети по этой части города. Распределение транспортной сети в основной части города имеет также фрагментарный характер с колебанием значений фрактальной размерности от 1,16 до 1,4. В среднем, по городу показатель фрактальной размерности равен 1,4, что является оптимальным с точки зрения развитости УДС и антропогенного воздействия на городскую ландшафт.

Что касается городской застройки (рис. 4, карта 2), то максимальные показатели Df соответствуют северной и северо-западной периферии города. Значения варьируют от 1,49 до 1,57, что также, по-видимому, обусловлено преобладанием неравномерно размещённой застройки. Большая часть города принимает более сглаженный диапазон значений, в пределах 1,2–1,27. Средний же показатель Df равен 1,21, что ближе к оптимуму.

Заключение

Таким образом, проведённые исследования по геоэкологической оценке г. Видное показали, что его урбогеосистема подвергается существенному антропогенному воздействию и представляет собой достаточно мозаичную картину по распределению антропогенной нагрузки, что влияет, в целом, на геоэкологическую ситуацию города и выбор вариантов планирования и благоустройства при проведении природоохранных мероприятий.

Наибольшее негативное воздействие на природную среду оказывают дорожно-транспортная сеть и интенсивная жилая застройка. Плотность дорожно-транспортной сети в среднем составляет от 4,5 до 8 дорог на 100 м². Плотность жилой застройки варьирует от 8,5 до 15 зданий на 100 м². В связи с этим возрастает роль зелёных зон (комплексов) города, особенно в центральной, наиболее антропогенно преобразованной части города. В районах интенсивной жилой застройки территории города площади зелёных зон значительно сокращаются (до 10% площади в год), что может привести к их дефициту и ухудшению качества природной среды.

Геоинформационные системы и специализированные программы обладают достаточно широкими техническими возможностями в области геоэкологической оценки и моделирования урбогеосистем. Геоэкологическая оценка на их основе позволяет устанавливать дифференциацию территории по различным критериям, оценивать плотность, развитость

компонентов городской инфраструктуры; определять диапазон устойчивости, степень воздействия антропогенной нагрузки на урбогеосистему и разрабатывать конкретные мероприятия по устойчивому экологически безопасному развитию г. Видное.

Литература

1. Кахраманова Ш.Ш. Моделирование в градостроительстве и экологии // Вестник ТГАСУ. 2012. № 1. С. 28–40.
2. Кочуров Б.И., Хазиахметова Ю.А., Ивашкина И.В., Сукманова Е.А. Ландшафтный подход в градостроительном проектировании // Юг России: экология, развитие. 2018. Т. 13. № 3. С. 71–82.
3. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 656 с.
4. Иудин Д.И., Чечин А.В., Кащенко О.В. Применение методов фрактального анализа и геоинформационных технологий для анализа дорожной сети урбанизированных территорий // Геоинформатика: Информация и космос. 2014. № 1. С. 84–87.
5. Орлова И.В. Оценка уровня экологической сбалансированности структуры земельных угодий аграрно-развитых регионов Западной Сибири // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Самара. 2013. Т. 15. № 3 (3). С. 1–6.
6. Turchin P. Evolution in population dynamics // Nature. 2003. No. 424. P. 257–258.
7. Lu Y., Tang J. Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: a study of the dallas-fort worth area // Environment and Planning and Design. 2004. V. 31. P. 895–914.
8. Администрация городского поселения Видное Ленинского муниципального района Московской области. Официальный сайт [Электронный ресурс] http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o_g_vidnoe (Дата обращения: 15.12.2022).
9. Вагин В.С., Шеина С.Г., Чубарова К.Г. Принципы и факторы устойчивого развития городских территорий // Интернет-журнал «Науковедение» 2015. Т. 7. № 3. С. 1–10 [Электронный ресурс] <http://naukovedenie.ru> (Дата обращения: 15.12.2022).
10. Earth Observing System. EOS Crop Monitoring [Электронный ресурс] <https://eos.com/es/ndsi/> (Дата обращения: 12.11.2022).
11. Павлов Ю.В. Фракталы как инструмент территориального планирования агломерационных систем // Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 2242–2248.
12. Рябова Э.Г. Экологические проблемы малых и средних городов Подмосковья // Проблемы региональной экологии. 2014. № 2. С. 44–47.
13. Приказ об утверждении методики определения индекса качества городской среды муниципальных образований Российской Федерации от 31 октября 2017 г.

№ 1494/пр. [Электронный ресурс] <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=282529&dst=1000000001%2C0#09074878626027192> (Дата обращения: 05.01.2023).

14. Битюкова В.Р., Соколова Е.П. Комплексная экологическая оценка территории Бульварного кольца г. Москвы // Информационно-аналитическое издание Москва: оценки специалистов. М.: Изд. Правительства Москвы, 2002. С. 1–32.

15. Copernicus Open Access Hub. The Center of Open Access of Satellite Images [Электронный ресурс] <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Дата обращения: 10.11.2022).

16. Мовчан М.А. Сравнительная оценка почвенно-растительного покрова по индексам SAVI и NDVI на примере участков Ближнего Подмосковья и Новой Москвы // Материалы Международной научно-практической конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование». М.: Первое экономическое издательство, 2022. С. 20–26.

17. Тунакова Ю.А., Новикова С.В., Шагидуллин А.Р., Валиев В.С. Мультифрактальный спектр структуры вариационных рядов наблюдений для интерпретации зонирования территории урбоэкосистемы // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 60–64.

18. Беленко В.В. Мониторинг объектов природно-экологического каркаса застраиваемых территорий по материалам космических съёмок // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 3. С. 21–27.

References

1. Kakhramanova Sh.Sh. Modeling in urban planning and ecology // Vestnik TGASU. 2012. No. 1. P. 28–40 (in Russian).

2. Kochurov B.I., Khaziakhmetova Yu.A., Ivashkina I.V., Sukmanova E.A. Landscape approach in urban planning design // South of Russia: Ecology, Development. 2018. V. 13. No. 3. P. 71–82 (in Russian).

3. Mandelbrot B. Fractal geometry of nature. Moskva: Institut komp'yuternyh issledovaniy, 2002. 656 p. (in Russian).

4. Yudin D.I., Chechin A.V., Kashchenko O.V. Application of fractal analysis methods and geoinformation technologies for the analysis of the road network of urbanized territories // Geoinformatics: Information and space. 2014. No. 1. P. 84–87 (in Russian).

5. Orlova I.V. Assessment of the level of ecological balance of the structure of land in the agro-developed regions of Western Siberia // Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2013. V. 15. No. 3 (3). P. 1–6 (in Russian).

6. Turchin P. Evolution in population dynamics // Nature. 2003. No. 424. P. 257–258.

7. Lu Y., Tang J. Fractal dimension of a transportation network and its relationship with urban growth: a study of

the dallas-fort worth area // Environment and Planning and Design. 2004. V. 31. P. 895–911.

8. Administration of the urban settlement of Vidnoye of the Leninsky municipal district of the Moscow region. Official website [Internet resource] http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o_g_vidnoe (Accessed: 15.12.2022) (in Russian).

9. Vagin V.S., Sheina S.G., Chubarova K.G. Principles and factors of sustainable development of urban areas // Online journal “Naukovedenie”. 2015. V. 7. No. 3. P. 1–10 [Internet resource] <http://naukovedenie.ru> (Accessed: 15.12.2022) (in Russian).

10. Earth Observing System. EOS Crop Monitoring [Internet resource] <https://eos.com/es/ndsi/> (Accessed: 12.11.2022)

11. Pavlov Yu.V. Fractals as a tool of territorial planning of agglomeration systems // Fundamental Research. 2013. No. 10. P. 2242–2248 (in Russian).

12. Ryabova E.G. Environmental problems of small and medium-sized cities of the Moscow region // Problemy regionalnoj ekologii. 2014. No. 2. P. 44–47 (in Russian).

13. Order on approval of the methodology for determining the urban environment quality index of municipalities of the Russian Federation dated October 31, 2017 No. 1494/пр. [Internet resource] <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=282529&dst=1000000001%2C0#09074878626027192> (Accessed: 05.01.2023) (in Russian).

14. Bityukova V.R., Sokolova E.P. Comprehensive environmental assessment of the territory of the Boulevard Ring of Moscow // Informacionno-analiticheskoe izdanie Moskva: ocenki specialistov. Moskva: Izdatelstvo Pravitelstva Moskvy, 2002. P. 1–32 (in Russian).

15. Copernicus Open Access Hub. The Center of Open Access of Satellite Images [Internet resource] <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (Accessed: 10.11.2022).

16. Movchan M.A. Comparative assessment of the soil and vegetation cover by the SAWI and NDVI indices on the example of the areas of the Near Moscow Region and New Moscow // Indication of the state of the environment: theory, practice, education: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferencii. Moskva: Pervoe ekonomicheskoe izdatel'stvo, 2022. P. 20–26 (in Russian). doi: 10.18334/9785912924248.20-26

17. Tunakova Y.A., Novikova S.V., Shagidullin A.R., Valiev V.S. Multifractal spectrum structure of variation series of observations to interpret the zoning of the territory of urban ecosystems // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 4. P. 60–64 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-060-064

18. Belenko V.V. Monitoring of objects of the natural-ecological framework of the undeveloped territories based on satellite imagery // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 3. P. 21–27 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-021-027