

Б.И. КОЧУРОВ, М.А. МОВЧАН

Институт географии РАН, 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Россия,
camertonmagazin@mail.ru, movchan.m97@gmail.com

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ГОРОДА ВИДНОЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Современные научные исследования в области геоэкологии, урбоэкологии и градостроительства сосредоточены на вопросах геоэкологической оценки и управления устойчивым развитием городскими системами (урбогеосистемами). В статье освещены как традиционные методы геоэкологической оценки, включающие оценку экологических рисков, сравнение по показателям ПДК и ПДУ, так и современные, такие как методы дистанционного зондирования Земли (анализ спутниковых снимков) и моделирование — мультифрактальный анализ урбогеосистем. Помимо этого используются данные государственной статистики и экологического мониторинга города и собственных полевых исследований. Установлено, что для решения задач городского планирования и управления территориями на основе принципов устойчивого развития требуется такая система геоэкологической оценки, которая отражала бы степень развитости структуры урбогеосистем, в том числе отклонение развития урбогеосистемы от оптимума в условиях многокомпонентности антропогенных нагрузок и рисков нарушения устойчивого функционирования урбогеосистемы. На основе фрактального моделирования воздействия антропогенных факторов произведен расчет данных относительно дефицита или же избыточности их воздействия. Преимущество территориального планирования и предложение мероприятий по устойчивому развитию г. Видное на основе фрактального анализа состоит в обосновании оптимальной степени застройки и развития транспортной сети; в снижении риска хаотического разрастания города и проблем (в первую очередь, перегруженности автодорог и загрязнения компонентов среды); в достижении минимального уровня пространственной фрагментации городской среды.

Ключевые слова: урбогеосистема, территориальное планирование, экологический риск, фрактальный подход, г. Видное, устойчивость.

B.I. KOCHUROV, M.A. MOVCHAN

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences,
119017, Moscow, per. Staromonetny, 29, Russia, camertonmagazin@mail.ru, movchan.m97@gmail.com

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE CITY OF VIDNOE USING MULTIFRACTAL ANALYSIS

Modern scientific research in the field of geoecology, urban ecology and urban planning focuses on the issues of geoecological assessment and management of sustainable development of urban systems (urban geosystems). In the article highlights both traditional methods of geoecological assessment, including environmental risk assessment, comparison of MPC and MPL indicators, as well as modern methods such as remote sensing of the Earth (analysis of satellite images) and modeling — multifractal analysis of urban geosystems. In addition, the article uses data from state statistics and environmental monitoring of the city and data from its own field research. It has been established that in order to solve the problems of urban planning and management of territories based on the principles of sustainable development, such a system of geoecological assessment is required that would reflect the degree of development of the structure of urban geosystems, including the deviation of the development of urban geosystems from the optimum in conditions of multicomponent anthropogenic loads and risks of disruption of the sustainable functioning of the urban geosystem. Using the fractal modeling of the impact of anthropogenic factors, data on the deficit or redundancy of their impact were calculated. The advantage of territorial planning and the proposal of measures for the sustainable development of the city of Vidnoye based on fractal analysis consists in justifying of the optimal degree of construction and development of the transport network, in reducing the risk of chaotic sprawl of the city and problems (first of all, congestion of roads and pollution of environmental components), and also in achieving a minimum level of spatial fragmentation of the urban environment.

Keywords: urban geosystem, territory planning, environmental risk, fractal approach, Vidnoe city, sustainability.

ВВЕДЕНИЕ

Деятельность промышленных предприятий и коммунальных служб, рост интенсивности движения и количества автотранспорта резко снижают комфортность проживания населения. Геоэкологическая оценка новейшими методами, а именно с помощью моделирования, представляет собой принципиально новое научное направление в исследовании урбанизированных территорий. Работ, в которых полностью была бы описана методика моделирования на основе ГИС-технологий, а также с использованием мультифрактального анализа, практически нет, насчитывается всего несколько статей и учебных пособий [1–3]. Исследования касаются в основном зарубежных городов или носят во многом более частный характер [4, 5]. Тем не менее на сегодня не фигурируют методы количественного фрактального анализа в официальных методических руководствах, основное внимание сконцентрировано на санитарно-гигиенических нормативах.

Актуальность исследования заключается в оценке негативной стороны урбанизации, включающей в себя рост численности населения, увеличение площади и плотности городской застройки, загрязнение компонентов городской среды, уменьшение площади зеленых зон.

В последние 5–10 лет степень урбанизированности изучаемой территории приобретает все более трудно контролируемый характер, особенно в сфере застройки и транспортной сети, что влечет за собой чрезмерное влияние антропогенных факторов на развитие всей урбогеосистемы. При проведении исследований неоднократно были выявлены экологические проблемы населенного пункта, связанные с загрязнением воздушной, почвенной среды и физическим загрязнением.

Цель — рассмотреть современные методологические подходы к геоэкологической оценке муниципального образования г. Видное и предложить пути устойчивого природопользования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Характеристика объекта-территории. Город Видное — центр Ленинского городского округа Московской области с 2019 г. Общая площадь городского округа составляла на 2022 г. около 18 км², а непосредственно самой жилой зоны — порядка 7 км². Населенный пункт располагается в 3 км южнее МКАД, на левом берегу р. Битцы, которая, в свою очередь, является левым притоком р. Пахры. По западной периферии города проходит федеральная трасса М4 «Дон» и Павелецкое направление железной дороги со станцией Расторгуево; это основные транспортные магистрали, которые соединяют населенный пункт с Москвой [6, 7].

Оценка и типы загрязнений компонентов. Геоэкологическая оценка подразумевает определение состояния как отдельных компонентов городской среды, так и урболандшафта в целом. Она может быть проведена посредством как традиционных методов с использованием критериев качества среды — ПДК и ПДУ, комплексных индексов качества городской среды или коэффициентов устойчивости и стабильности ландшафтов, вычислением экологических рисков, связанных с химическим и физическим загрязнением городской среды, так и с методами моделирования. Геоэкологическая оценка предполагает также анализ городской инфраструктуры (застройки, улично-дорожной сети, степени озелененности территории).

Традиционные методы. На этапе сбора информации для оценки задействовались инструментальные и сравнительные методы, включавшие измерение концентрации загрязнителей воздушной среды, физических полей (шумового, светового, электромагнитного и т. д.) и последующее сравнение с допустимыми нормами (по справочным данным). Далее были задействованы методы оценки рисков соответствующих загрязнений, одновременно с картографированием полученных результатов. Для химических и физических загрязнителей применялись различные методические подходы. Риски, связанные с загрязнением воздуха, вод и почв, вычисляются по формулам:

$$HQ = C_{\text{факт}} / Rfc, \quad (1)$$

$$HI = HQ1 + HQ2 + HQ3 \dots, \quad (2)$$

где $C_{\text{факт}}$ — фактическая концентрация, мг/м³, Rfc — безопасная концентрация, мг/м³, $HQ1$ — расчетные коэффициенты опасности, HI — суммарный индекс риска, токс. эфф/год.

Риски, обусловленные физическим загрязнением городской среды, рассчитывались отдельно для каждого из полей.

Динамика урбогеосистем по фрактальным показателям

Уравнения фрактальности	Характеристика
$D_{\Phi} \rightarrow 1,5; R_e \rightarrow 0$	Наиболее благоприятная динамика урбогеосистемы
$1,2 < D_{\Phi} < 1,7; 0 < R_e < 1$	Саморегулируемая динамика урбогеосистемы
$D_{\Phi} \rightarrow (1,2 \vee 1,7); R_e \rightarrow 1$	Неустойчивая динамика (бистабильность) урбогеосистемы, при которой утрачиваются свойства саморегуляции
$D_{\Phi} > 1,7; R_e = 1$	Кризисная динамика, при которой наблюдаются необратимые изменения в урбогеосистеме

Примечание. D_{Φ} — фрактальная размерность объекта; R_e — режим устойчивости.

Современные методы геоэкологической оценки представлены дистанционным зондированием Земли (ДЗЗ) и компьютерным моделированием. Методы ДЗЗ, как правило, являются дополнением к основным, с их помощью проводятся расчеты параметров городской инфраструктуры, степени озеленения территории и т. п. [8, 9]. Расчет интенсивности озелененности осуществляется с использованием нормализованного разностного вегетационного индекса по формуле:

$$NDVI = (NIR - RED)/(NIR + RED), \quad (3)$$

где $NDVI$ — нормализованный разностный вегетационный индекс, NIR — отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED — отражение в красной области спектра.

На заключительном этапе геоэкологической оценки проводилось ГИС-моделирование, предполагающее математические расчеты параметров загрязнений, инфраструктуры и озелененности городской территории. Результаты, полученные на основе фрактального анализа, позволяют оценить меру усложненности (плотности) распределения каждого из них и возможности дальнейшего пространственного развития города [1, 8, 10]. Используемая методика дает возможность количественно прогнозировать наступление неблагоприятных (катастрофических) процессов развития урбогеосистемы, а также принимать соответствующие решения по управлению городским хозяйством.

Измерения фрактальной размерности производились следующим образом. Выполнялась разбивка карт на клетки, при этом разбивка квадратов варьировалась в зависимости от масштаба карты, ее загруженности и рассматриваемого параметра. Фрактальная размерность рассчитывалась по формуле [1, 8, 10]

$$D_{\Phi} = \log N / \log (1/r), \quad (4)$$

где D_{Φ} — показатель фрактальной размерности, $1/r$ — понижающий коэффициент (например, если предыдущая клетка делится на 25 клеток, то $r = 5$, если на 16, то $r = 4$). За N бралось количество заполненных (например, застроенных) квадратов в анализируемом масштабе, т. е. если застройка имеется в 25 квадратах из 25, то $D_{\Phi} = 2$, если застройка имеется в 12 квадратах из 25, то $D = 1,25$.

Показатели фрактальности динамики развития урбосистемы более подробно представлены в таблице. В ней приводится диапазон устойчивости урбогеосистемы в виде уравнений: от наиболее благоприятной динамики развития системы при режиме устойчивости $R_e \rightarrow 0$ и показателе фрактальной размерности D_{Φ} , равном 1,5, до кризисного состояния при $R_e \rightarrow 1$ и $D_{\Phi} = 1,7$. Иными словами, начальный диапазон устойчивости системы характеризуется оптимальным количеством факторов и/или ресурсов, способствующим существованию и дальнейшему ее развитию. В то же время приближение к крайней границе диапазона устойчивости отражает избыточность факторов, при которой система деградирует и теряет способность функционирования.

Относительно процедур расчетов и проведения моделирования стоит отметить, что применяются как традиционные компьютерные программы для установления статистических рядов — Excel и Statistic, так и специализированные программные пакеты для построения карт и компьютерных моделей — QGIS, SAGA и GWYDDION — для определения фрактальной размерности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Результаты оценок. Проведенная геоэкологическая оценка позволила построить ряд карт по распространению и динамике ряда показателей городской инфраструктуры. Карта распределения загрязнения воздушной среды и физического — светового и шумового — загрязнения построена на

основе расчетов экологического риска. На территории г. Видное выделяются три ареала с максимальными значениями суммарного коэффициента опасности (индекса HI), составляющего более 17,7 токсических эффектов в год и, соответственно, риска в интервале 0,0001–0,0002, связанного с загрязнением атмосферы, т. е. в среднем 20 человек подвергаются негативному воздействию ежегодно. Эти максимумы приурочены к западной и восточной перифериям территории города, а северо-западная и юго-восточная окраины крайне благоприятны в отношении рисков с их минимальными значениями (рис. 1). Относительно распределения физических полей, наиболее проблемными ареалами в отношении рисков от физического воздействия и тенденций к их росту являются западная и центральная части города, а также южная периферия — в случае светового загрязнения. Значения риска варьируются в диапазоне от 0,0570 до 0,0621 ед., а вклада ночной освещенности — 0,26–1, средневзвешенный показатель по городу равен около 0,060 ед., что характеризует риск как средний, а осредненная доля засветки равна 2,35 ед., т. е. ее вклад относительно низкий (рис. 2).

В ходе изучения динамики состояния растительного покрова г. Видное (рис. 3) отчетливо прослеживается высокая степень озелененности городской территории, особенно центральных районов — до 50–60 % от всей площади. Индекс $NDVI$ принимает значения от 0,5 и выше на большей части территории, что также говорит о наличии относительно высокой степени озеленения территории. Растительность лесопарковых территорий также имеет достаточно высокий индекс $NDVI$, что свидетельствует об удовлетворительном состоянии растений и их относительно высокой доли в городе. Причем с 2019 по 2021 г. наблюдается некоторое увеличение максимального показателя, равного 1, по площади распространения.

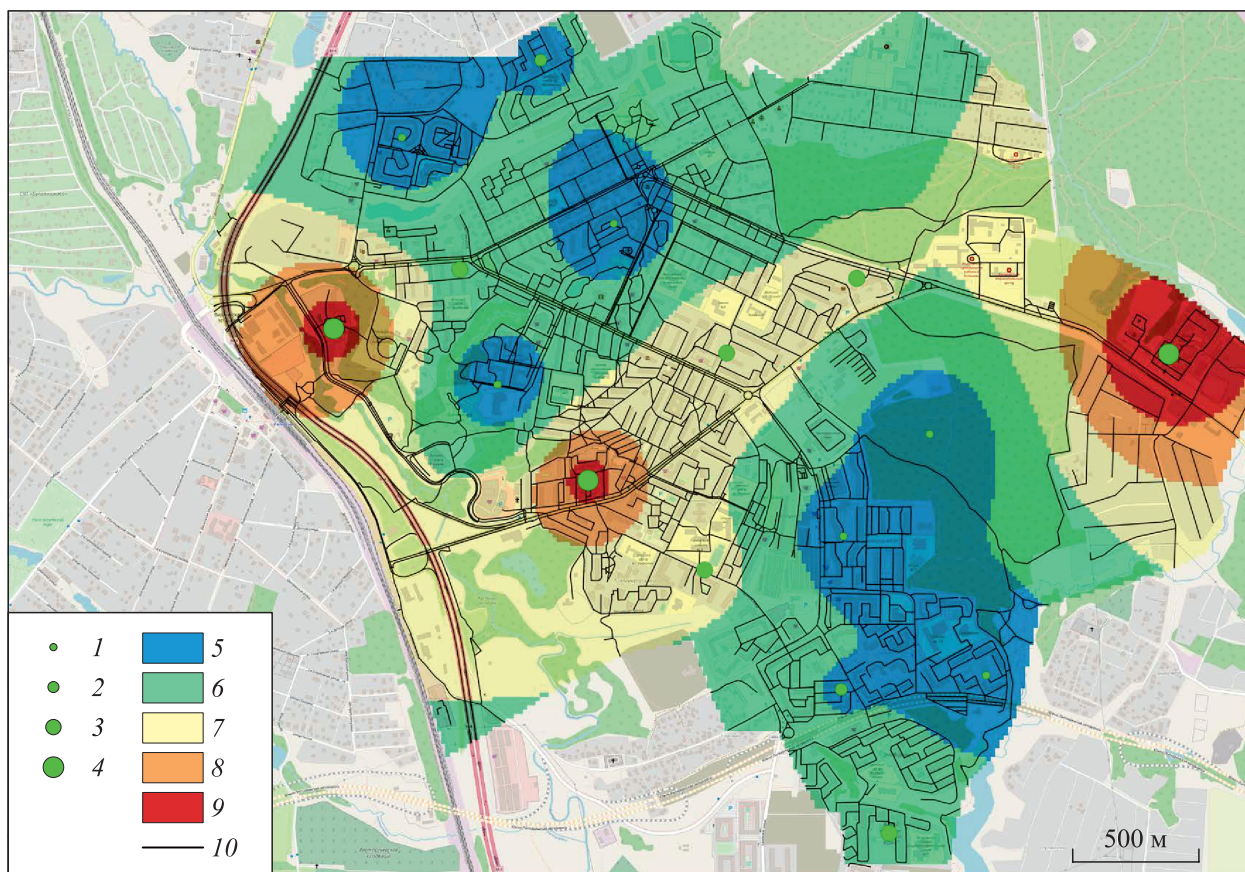


Рис. 1. Пространственное распределение рисков от загрязнения воздушной среды г. Видное в 2021 г.

Риск в пересчете на число населения (R): 1 — 0,00002–0,00004; 2 — 0,00004–0,00007; 3 — 0,00007–0,0001; 4 — 0,0001–0,0002. Суммарный индекс риска (HI), токс. эфф/год: 5 — <6; 6 — 6–10; 7 — 10–14; 8 — 14–17,5; 9 — >17,5. 10 — улично-дорожная сеть.

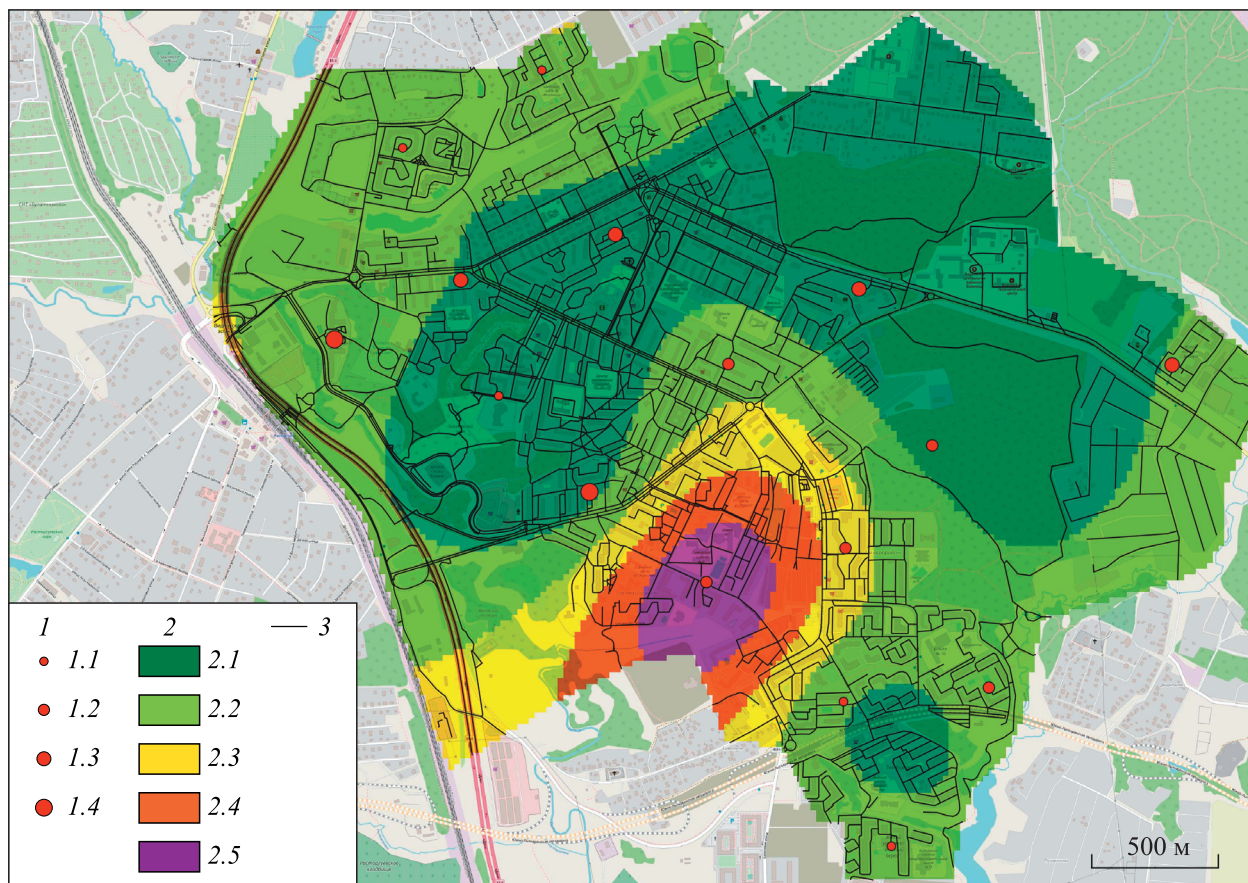


Рис. 2. Пространственное распределение рисков и суммарного вклада от физических полей (шума ($R_{\text{сов}}$) и ночной засветки, ед.) в пределах территории г. Видное в 2021 г.

1 — риск от воздействия шума ($R_{\text{сов}}$): 1.1 — 0,0270–0,0577; 1.2 — 0,0577–0,0583; 1.3 — 0,0583–0,0601; 1.4 — 0,0601–0,0621. 2 — общий вклад ночной засветки, ед.: 2.1 — <0,26; 2.2 — 0,26–0,45; 2.3 — 0,45–0,63; 2.4 — 0,63–0,82; 2.5 — >0,82. 3 — улично-дорожная сеть.

Большое внимание было уделено проведению геоэкологической оценки плотности улично-дорожной сети и застройки как существенных факторов антропогенной нагрузки на геосистему г. Видное (рис. 4). Наибольшая длина дорог и их плотность приходится на центральные и частично северо-восточные районы населенного пункта. Для этих же районов, особенно для центральной части города, характерен интенсивный автомобильный трафик — до 3–4 тыс. авт/ч, по проведенным подсчетам. Что же касается застройки, то наиболее застроенными являются периферийные территории, особенно занимающие северную, восточную и частично южную окраины населенного пункта.

Перспективы применения методов моделирования. Методы моделирования применимы, в том числе, к оценке степени загрязнения компонентов природной среды (по подсчетам плотностей изолиний, попавших в исследуемые квадраты), к вычислению плотности пересечений и суммы длин автодорог, а также степени застроенности территории (также по числу элементов, находящихся в квадратах). Суть метода заключается в следующем: неполное заполнение квадратов означает ограниченность факторов воздействия, а полное указывает на сильное влияние факторов, и, как следствие, неблагоприятное состояние урбогеосистемы. В первом случае возникшая ситуация может быть в некоторой степени благоприятной для городской среды из-за низкого уровня ее загрязнения, но недостаточность развития инфраструктуры сказывается на уровне комфортности проживания населения. Подобные методы позволяют своевременно спрогнозировать вероятностные изменения качества городской среды, оперативно выявлять приоритетные факторы антропогенной нагрузки, определяющие экологическую ситуацию и качество жизни городского населения. Помимо этого, на основе подобного моделирования в дальнейшем можно спрогнозировать вероятные последствия антропогенных нагрузок и их количественные величины, предложить рекомендации по устойчивому развитию г. Видное.

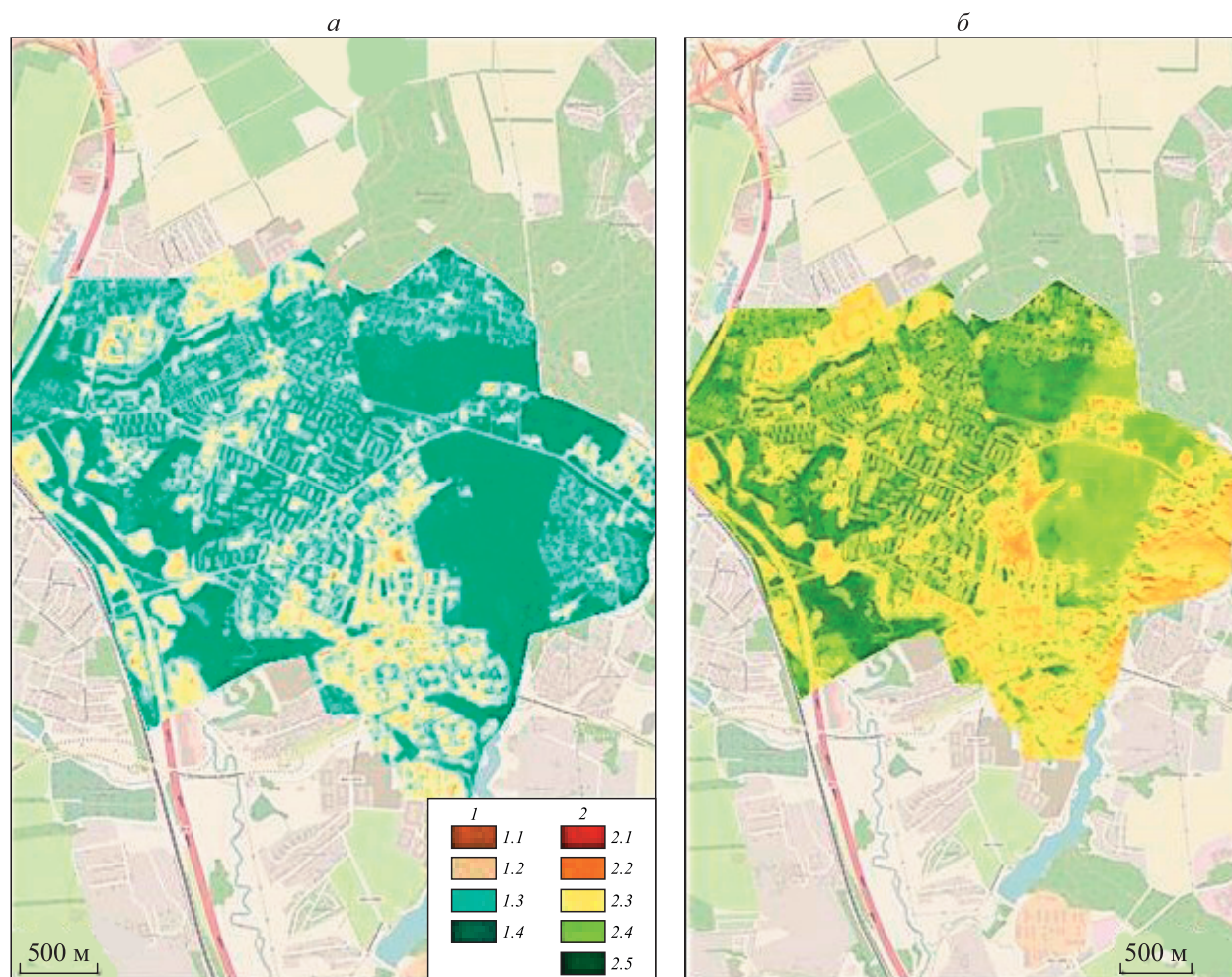


Рис. 3. Динамика состояния растительного покрова по индексу $NDVI$ в пределах г. Видное в июне 2021 г. (а) и июне 2019 г. (б).

Градации индекса: 1 — за 2021 г.: 1.1 — $< -0,29$; 1.2 — $-0,29...0,14$; 1.3 — $0,14-0,57$; 1.4 — $0,57 - >1$; 2 — за 2019 г.: 2.1 — $< -0,69$; 2.2 — $-0,69...-0,27$; 2.3 — $-0,27...-0,15$; 2.4 — $0,58-1$; 2.5 — >1 .

Мероприятия по снижению остроты экологических проблем и устойчивому развитию. Главными критериями устойчивого развития являются безопасность и рост качества жизни населения. В математическом плане эта задача сводится к управлению рисками урбогеосистем, в которых административные методы управления должны быть соразмерны ситуативным (адаптационным) возможностям геосистемы. Устойчивость городской геосистемы (урбогеосистемы) равносильна сохранению отдельных частей (градостроительных объектов, элементов) и целого (города) и определяется соразмерностью экстенсивных (функционирования инфраструктуры) и интенсивных форм развития в пространстве. Модельные методы позволяют реализовать численную характеристику эффективности использования городской территории с помощью скейлинга (масштабирования) элементов городской среды и осуществить выборку мероприятий по устойчивому развитию на основе количественных показателей. Мероприятия в этом случае будут следующие: мониторинг и контроль источников загрязнения воздушной среды в случаях наступления неблагоприятных метеорологических условий и/или жалоб со стороны населения; мониторинг и контроль источников и факторов физического загрязнения, особенно шумового и светового (как минимум — раз в полгода); составление прогноза по выявленным приоритетным загрязнителям и моделей их распределения и влияния на компоненты города; пересмотр концепции в области застройки территории города, включающий существенное ограничение неконтролируемой застройки, уменьшение этажности и плотности размещения проектируемых домов, реновация старых жилых зданий, подразумевающая их капитальный ремонт и благоустройство придомо-

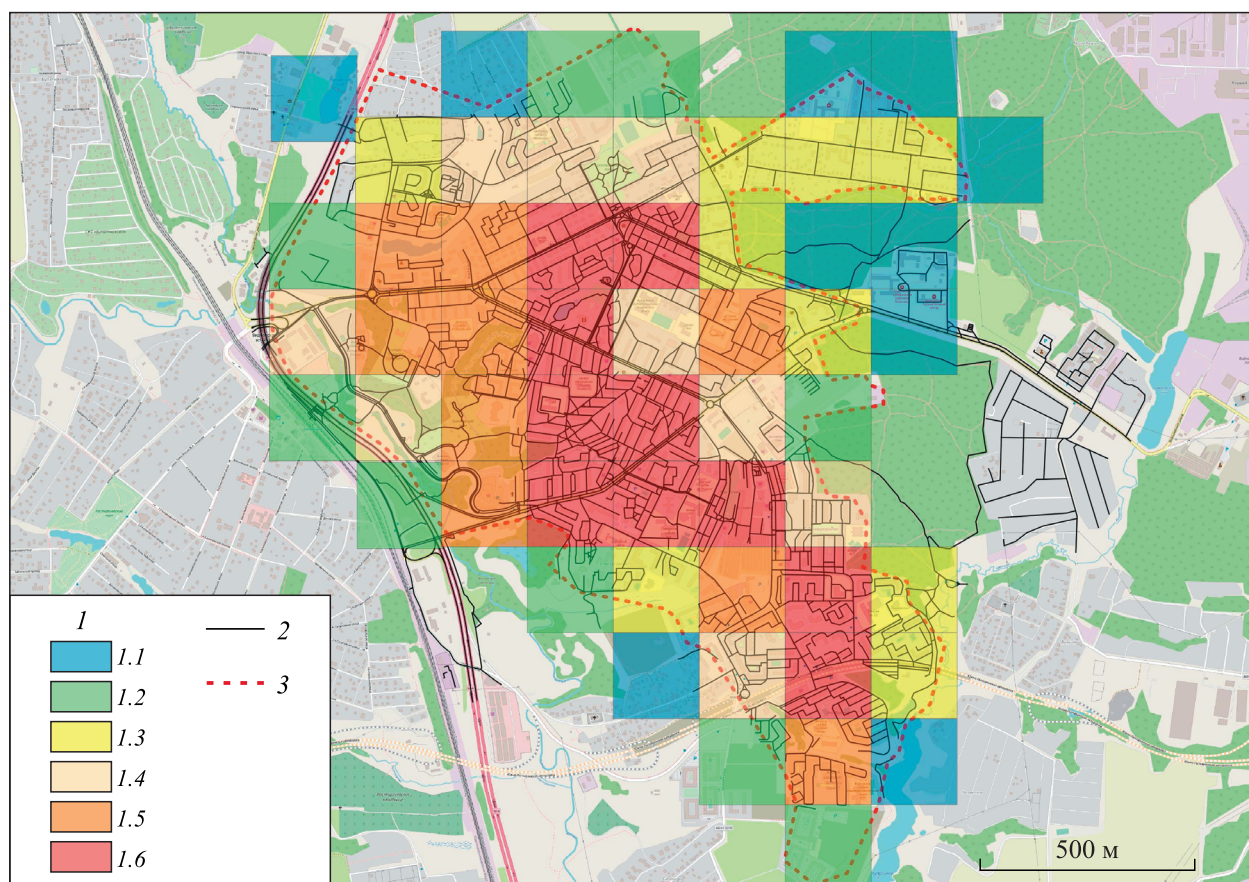


Рис. 4. Плотность улично-дорожной сети г. Видное в 2021 г.

1 — плотность дорог, км/0,5 км²: 1.1 — 0,36–1; 1.2 — 1,1–2,1; 1.3 — 2,1–3,4; 1.4 — 3,4–4,2; 1.5 — 4,2–5,5; 1.6 — 5,5–7. 2 — дорожная сеть. 3 — границы района исследования.

вых территорий, частичное переоборудование крупных офисных помещений под жилье, возможно создание экополисов на территории новых микрорайонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Город Видное Московской области представляет собой сложную урбогеосистему с активной составляющей, отвечающей за самоорганизацию во внешней среде. Устойчивость данной системы, ее развитие могут быть оценены с использованием фрактального анализа, который устанавливает связь размера (развитости объекта) и структуры системы с ее свойствами.

Динамика сложных систем представляет собой чередование экстенсивных (развитие вширь) и интенсивных (сохранение функционирования, самоорганизация) форм развития. Для сохранения устойчивости такое чередование не должно выходить за рамки экологической емкости урбогеосистемы, что является важнейшим условием проведения геоэкологической оценки и определения путей устойчивого, экологически сбалансированного развития города.

Установлено, что высокая плотность компонентов городской инфраструктуры, в частности, дорожно-транспортной сети, с одной стороны, способствует повышению комфортности проживания населения, а с другой — увеличивает антропогенную нагрузку на территорию населенного пункта. В центре г. Видное наблюдается явный избыток улично-дорожной сети, выражающийся в интенсивном автомобильном трафике до 3–4 тыс. авт/ч, с преобладанием легковых автомобилей. Все это определяет весьма высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха от выхлопных газов.

Относительно высокий показатель нормализованного разностного вегетационного индекса *NDVI* свидетельствует о хорошем состоянии растительного покрова города, что в целом благоприятно сказывается на экологическом состоянии населенного пункта.

Полученные результаты в ходе геоэкологической оценки могут найти применение при разработке планов и документов территориального планирования, рекомендаций по улучшению экологической ситуации г. Видное.

Работа выполнена по теме Государственного задания Института географии РАН (FMGE-2019-0007 AAAA-A19-119021990093-8) «Оценка физико-географических, гидрологических и биотических изменений окружающей среды и их последствий для создания основ устойчивого природопользования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иудин Д.И., Чечин А.В., Кашенко О.В.** Применение методов фрактального анализа и геоинформационных технологий для анализа дорожной сети урбанизированных территорий // Геоинформатика: Информация и космос. — 2014. — № 1. — С. 84–87.
2. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. — М.: Изд-во Ин-та компьютерных исследований, 2002. — 656 с.
3. **Руководство** по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. Р 2.1.10.1920-04 [Электронный ресурс]. — <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&-documentId=85628#h1595> (дата обращения 02.11.2022).
4. **Turchin P.** Evolution in population dynamics Nature // Nature. — 2003. — Vol. 424. — P. 257–258.
5. **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 B: Planning and Design. — 2004. — Vol. 31. — P. 895–911.
6. **Администрация** городского поселения Видное Ленинского муниципального района Московской области. Официальный сайт [Электронный ресурс]. — http://vidnoe.adm-vidnoe.ru/?show=o_g_vidnoe (дата обращения 05.11.2022)
7. **Московская область.** Атлас / Под ред. М.А. Федосовой, Г.Ю. Грюнберга, Э.Г. Галиуллиной. — М.: ГУГК, 1976. — 40 с.
8. **Copernicus** Open Access Hub. Центр открытого доступа космических снимков [Электронный ресурс]. — <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> (дата обращения 10.11.2022).
9. **Earth Observing System.** EOS Crop Monitoring [Электронный ресурс]. — <https://eos.com/es/ndsi/> (дата обращения 12.11.2022).
10. **Соболь С.В.** Фрактальные параметры водных объектов: монография. — Нижний Новгород: Изд-во Нижегород. гос. архит.-строит. ун-та, 2019. — 232 с.
11. **Генеральный** план городского поселения Видное Ленинского муниципального района Московской области, ч. 2, 2022 г. [Электронный ресурс]. — http://vidnoe24.ru/news/images/2012/vidnoe_shemi_utv_part.pdf (дата обращения 01.12.2022).
12. **Кахраманова Ш.Ш.** Моделирование в градостроительстве и экологии // Вестн. Томск. гос. архитектур.-строит. ун-та. — 2012. — № 1. — С. 28–40.
13. **Методические** рекомендации 2.1.10. Состояние здоровья населения в связи с состоянием окружающей среды и условиями проживания населения. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума. — М: Федерал. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2011. — 40 с.
14. **Сокольская Е.В.** Методика геоэкологической оценки качества городской среды на основе многофакторного моделирования: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. — Тирасполь: ООО «Ренессанс», 2019. — 24 с.

Поступила в редакцию 28.12.2022

После доработки 11.09.2023

Принята к публикации 23.11.2023