

УДК 528.942

В.М. Яблоков¹

ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ И ДИНАМИКИ ПРИРОДНО-ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КАРКАСА МОСКВЫ НА ОСНОВЕ ОТКРЫТЫХ ГЕОДАНЫХ

Приводится методика геоинформационного анализа структуры и динамики природно-экологического каркаса урбанизированных территорий на основе открытых пространственных данных на примере Москвы и прилегающих территорий. В результате проведенного исследования с использованием сеточной геоинформационной модели и применением метода hot-spot анализа выявлены элементы природно-экологического каркаса Москвы, вычислены их параметры и составлены карты. С помощью разновременных космических снимков оценена степень трансформации каркаса за последние 16 лет. Выявлена его несбалансированная территориальная структура, оценены возможности для оптимизации. Анализ динамики площадей природных и озелененных территорий показал тенденцию к их сокращению как в связи с естественными процессами, так и в результате принимаемых градостроительных решений, ведущих к изъятию экологически эффективных территорий. Актуальная информация о структуре и динамике природно-экологического каркаса, которую можно оперативно получить при использовании открытых пространственных данных является необходимым элементом обеспечения экологически устойчивого развития урбанизированных территорий.

Ключевые слова: ГИС, ДДЗ, качество городской среды, зеленая инфраструктура, hot-spot анализ.

Введение. Современное градостроительное планирование базируется на принципах экологически устойчивого развития, достижение которого связано со многими условиями, в том числе с поддержанием экологического баланса урбанизированной территории [WHO, 2016]. Существует значительное количество подходов к определению совокупности элементов городской среды, выполняющих экологические функции, к которым относятся: зеленая инфраструктура, зеленый фонд, природный комплекс и др. [Владимиров, 1999; Родоман, 1999; Dige, 2011; Федеральный закон ..., 2002]. В данной работе используется понятие «природно-экологического каркаса» (ПЭК), который, по мнению автора, представляет собой систему взаимосвязанных внутригородских и пригородных природных и озелененных территорий, объектов городского озеленения, выполняющих средообразующие, санитарно-гигиенические, регулирующие, рекреационные и другие важные для обеспечения благоприятной окружающей среды функции. ПЭК обладает свойствами, присущими системам, в том числе целостностью (когда связь компонентов каркаса сильнее, чем с внешними элементами), эмерджентностью (возможности компонентов системы в совокупности больше, чем по отдельности), иерархичностью (ПЭК состоит из подсистем и сам является подсистемой экологического каркаса региона).

Информация о качественных и количественных характеристиках ПЭК является необходимой для принятия экологически безопасных градостроительных решений, а также способствует сохранению и развитию природных и озелененных территорий го-

рода. В настоящее время для анализа структуры и динамики ПЭК, его характеристик целесообразно применение геоинформационных технологий, в том числе проектирование базы пространственных данных о компонентах каркаса и факторах городской среды, влияющих на его функционирование, использование методов пространственного анализа, а также картографическая визуализация.

Объектом исследования выступает геоинформационная пространственно-временная модель природно-экологического каркаса Москвы, сформированная на основе открытых геоданных.

Целью настоящего исследования является оценка структуры и динамики ПЭК Москвы. В задачи данной работы входит разработка методики геоинформационного анализа при использовании открытых пространственных данных дистанционного зондирования, а также данных краудсорсинговых картографических проектов.

Использование открытых данных обусловлено общественным запросом к информационным продуктам в эпоху глобализации, в том числе их прозрачности, достоверности, возможности верификации, публикации, свободного использования [Стырин, 2012]. Кроме того, открытые данные все меньше уступают по качеству коммерческим продуктам, в том числе увеличивается разрешающая способность открытых космических снимков, накоплен значительный объем геоинформации, возрастает ее точность, позволяющая проводить все более детальные исследования, особенно для урбанизированных территорий.

Природно-экологический каркас Москвы представляется перспективным объектом изучения в

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Региональный центр мировой системы данных, аспирант; e-mail: vasily.yablokov@gmail.com

связи с высокой социальной значимостью информации о его состоянии и отсутствием актуальных данных о его характеристиках, в частности динамических. В последние годы наблюдается значительная трансформация ПЭК Москвы, связанная как с естественными процессами (сменой лесных сообществ, участившимися случаями опасных и неблагоприятных природно-климатических явлений, зарастанием бывших сельскохозяйственных полей и др.) [Абатуров, 2014], так и с высоким уровнем урбанизации столичного региона, принимаемыми градостроительными решениями по изъятию территорий, занятых объектами природного комплекса и зеленым фондом [Майорова, 2015].

Материалы. Геоинформационный анализ природно-экологического каркаса Москвы базировался на использовании трех типов открытых данных:

- данные дистанционного зондирования Земли (Sentinel-2A, Landsat);
- данные проекта OpenStreetMap;
- нормативно-правовые акты Российской Федерации.

Sentinel-2A – семейство спутников дистанционного зондирования Земли, которые были запущены 23.06.2015 г. в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды «Коперник» Европейского космического агентства (ESA). Спутники оснащены оптико-электронным мультиспектральным сенсором. Для обработки доступны данные в виде растровых изображений с пространственным разрешением от 10 до 60 м в различных спектральных диапазонах. В данном исследовании использовались 4 канала с разрешением 10 м: голубой (B2), зеленый (B3), красный (B4), ближний инфракрасный (B8).

Landsat – проект NASA, наиболее продолжительная программа получения данных космической съемки Земли. Первый спутник был запущен в 1972 г. В настоящее время на орбите находятся 2 спутника: Landsat 7 и Landsat 8. Период действия программы мониторинга Земли, открытость данных позволяют получать данные о многолетней динамике видимого ландшафта планеты. В работе использовались разновременные снимки с 2000 по 2016 гг.

Openstreetmap (OSM) – краудсорсинговый веб-картографический проект по созданию открытой географической карты мира, созданный в 2004 г. в Великобритании. В сентябре 2017 г. в проекте участвовало более 4 миллионов пользователей со всего мира. Данные распространяются на условиях свободной лицензии CC BY-SA. Данные OSM для урбанизированных территорий оцениваются как надежные [Senaratne, 2017] и являются источником наиболее актуальной геоинформации.

Нормативно-правовые акты Российской Федерации являются наиболее точным источником данных об административно-территориальном делении, статусе и назначении территории, видах разрешенного использования. Данные о недвижимом имуществе, а именно земельных участках и их характеристиках, являются основой правового регулирования,

использования и охраны территорий. Публичная кадастровая карта является официальным информационным ресурсом о земельных участках, в том числе об их границах. В работе применялись данные кадастра недвижимости для корректировки границ. Также для более полной типологии данных использовались действующий Генеральный план развития Москвы до 2035 г., который имеет статус городского закона, а также редакции Лесного кодекса, обосновывающие границы пригородных лесов Москвы.

Методы. Обработка данных, в том числе подготовка, корректировка, а также последующий пространственный и статистический анализ проводились в геоинформационной среде ArcGIS. Первоочередным этапом стала организация базы пространственных данных (БПД) для хранения и анализа рассматриваемых выше открытых данных в соответствии с целями исследования. БПД является целесообразной проводимому анализу, ее структура отражена в таблице.

Последующий анализ заключался в получении детальной пространственной информации об элементах городской среды, типах использования земель, позволяющих выявить природно-экологический каркас, а также влияющие на него факторы.

На основе геоданных OSM были подготовлены наборы данных о застройке (с делением на типы – жилая, коммерческая, промышленная, социальная инфраструктура, общего и специального назначения), транспортной инфраструктуре (автомобильные дороги и сети железнодорожного транспорта, их площадные характеристики), водных объектах, границах административно-территориального деления. При использовании нормативно-правовых актов, в том числе Генерального плана города Москвы, данных о границах, застройке, транспортной сети дополнены семантической информацией. Границы территориального деления недвижимости скорректированы при использовании данных кадастра недвижимости. На основе предыдущей редакции Лесного кодекса РФ добавлены границы Лесопаркового защитного пояса Москвы (ЛПЗП), которые в совокупности с новым территориальным делением Москвы (административная реформа 2011 года) стали районом последующего пространственного анализа.

На основе различных алгоритмов автоматизированного дешифрирования космических снимков были проведены многочисленные эксперименты по дешифрированию урболандшафтов и получены наборы данных о «видимом» ландшафте города [Lefebvre, 2016]. Наилучший результат показал алгоритм классификации растрового изображения методом деревьев решений, который позволил наиболее точно выделить природные и антропогенные урболандшафты [Pesaresi, 2016]. Результаты дешифрирования верифицированы с использованием данных геопорталов, поставляющих покрытия космических снимков сверхвысокого разрешения, и показали высокую надежность выбранного метода

Структура базы пространственных данных

Группа	Пространственные объекты	Тип локализации
Административно-территориальное деление	Административные границы муниципальных образований Москвы	Площадной
	Границы парков Лесопаркового защитного пояса	Площадной
Транспорт	Улично-дорожная сеть с делением на классы	Площадной
	Железнодорожные пути	Площадной
	Дорожная сеть с делением на классы	Линейный
Природные объекты	Растительность с делением на типы	Площадной
	Изменение растительного покрова по годам	Площадной
	Водные объекты	Площадной
	Открытые территории	Площадной
Строения	Здания с делением на классы	Площадной
Землепользование	Land cover	Ячейки растра
Данные дистанционного зондирования	Sentinel-2A, 2016 г.	Ячейки растра
	Landsat, 2000–2016 гг.	Ячейки растра

для используемых данных. Проведение верификации результатов дешифрирования путем составления матрицы ошибок показало точность 96%.

Результаты классификации методом деревьев решений соотнесены с более детальными данными OSM в границах, определенных нормативно-правовыми актами. В итоге получено непрерывное топологически верное покрытие land cover (землепользование) Москвы, на основе которого проводился последующий пространственно-статистический анализ и выявлялись урбанизированные территории, выполняющие функции природно-экологического каркаса. Далее будем использовать понятие «землепользование», которое включает в себя не только прямое использование земель под различные виды хозяйственной деятельности, но и территории, водные объекты, выполняющие экологическую функцию, в том числе как одного из видов разрешенного использования земельных участков в соответствии с Земельным кодексом РФ.

Последующий алгоритм исследования заключался в пространственном анализе показателей землепользования на основе регулярной гексагональной сети. Такой анализ данных является распространенным методом в географических исследованиях, позволяющим, с одной стороны, выявить пространственные закономерности распространения географических явлений, с другой – провести фильтрацию нетипичных для территорий значений показателей.

На основе регулярной сети проведен сопряженный анализ всех рассматриваемых типов землеполь-

зования, методом hot-spot выявлены территории, выполняющие функции природно-экологического каркаса.

Следующий этап работы связан с оценкой трансформации природно-экологического каркаса Москвы. На основе мультитременного анализа [Hansen, 2013] открытых данных космической съемки системы Landsat за 2000–2016 гг. выявлены изменения ПЭК, в частности, сокращение и прирост древесно-кустарниковой растительности для каждого периода. На основе сеточной модели проведен анализ динамики изменения площадей на исследуемой территории, выявлены ретроспективные характеристики ПЭК для референсных годов.

Результаты и обсуждение. Для Москвы и бывшего ЛПЗП проведена оценка соотношения природных и антропогенных ландшафтов на основе автоматизированного дешифрирования данных космической съемки и последующего геоинформационного анализа с использованием сеточной модели. В результате классификации ячеек модели методом hot-spot стало возможным выделить территории, выполняющие функции природно-экологического каркаса (санитарно-гигиенические, средообразующие, климатические, рекреационные), переходные классы, обеспечивающие высокое качество городской среды, а также классы с недостаточным нормативным количеством экологически значимых компонентов и низким качеством городской среды. По результатам данного анализа стало возможным составить карту природно-экологического каркаса Москвы (рис. 1).



Рис. 1. Природно-экологический каркас Москвы

Fig. 1. Moscow environmental infrastructure

Данная карта демонстрирует фактическое распределение территорий Москвы по их экологическим функциям. Территории классов «преимущественно естественные экосистемы» и «зеленая инфраструктура» представляют наибольшую ценность и нуждаются в сохранении и поддержании нынешнего состояния, остальные территории, с преобладанием антропогенных объектов, могут рассматриваться для реабилитации каркаса. Фактическая

структура каркаса показывает, в каких направлениях может идти его развитие и где необходимо увеличить связность его элементов. В настоящее время для территории Москвы в новых границах и ЛПЗП, которые занимают площадь 407 тыс. га, территории первых двух классов составляют 323 тыс. га (80%), преимущественно застроенные территории занимают около 83 тыс. га (20%), при этом население распределено неравномерно и проживает в основном

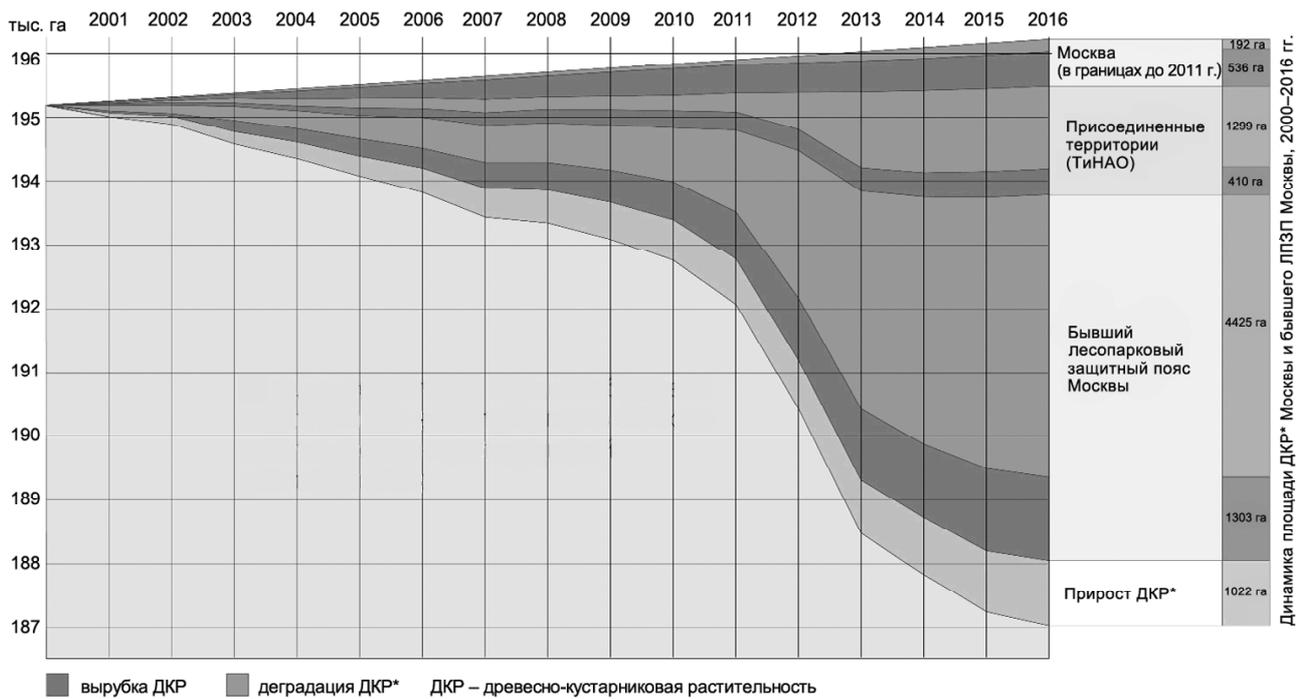


Рис. 2. Динамика природно-экологического каркаса Москвы за 2000–2016 гг.

Fig. 2. Moscow environmental infrastructure dynamics during 2000–2016

на высокоурбанизированных территориях с низкой экологической емкостью – 10,7 млн человек (69% от проживающих на территории исследования). Данные по площадям ПЭК в границах старой Москвы коррелируют с ранее проводимыми оценками площадей, занятых зелеными насаждениями. Визуальное дешифрирование коммерческих данных дистанционного зондирования [Минин, 2014] показало расхождение, равное 2%. При этом стоит отметить, что анализ проводился на 2012 год и повтор таких исследований практически невозможен в связи со спецификой используемых в работе данных.

На основе мультитременного анализа космической информации по данным Landsat и последующей агрегации при помощи сеточной модели вычислены изменения в структуре ПЭК Москвы за последние 16 лет. Данное исследование показало, как распределению элементов каркаса, подвергшихся наибольшему влиянию, связанному с высоким уровнем урбанизации столичного региона, так и естественную динамику природных территорий, таких как массовая гибель ельников и зарастание бывших сельхозугодий. На основе проведенного анализа вычислены балансы площадей сокращения и прироста древесно-кустарниковой растительности. Так, за последние 16 лет Москва в старых границах потеряла 728 га, Новая Москва 1708 га, ЛПЗП 5728 га. По естественным причинам на рассматриваемой территории исчезло 5915 га древесно-кустарниковой растительности, в связи с изъятием территорий под строительство – 2249 га (рис. 2).

Выводы:

– на основе открытых данных стало возможным выявление природно-экологического каркаса

урбанизированной территории, анализа его качественных и количественных характеристик;

– открытые данные дистанционного зондирования позволяют проводить регулярную актуализацию данных о природно-экологическом каркасе и оперативно выявлять его динамические характеристики;

– структура природно-экологического каркаса Москвы является наследием советского градостроительного планирования, которое предъявляло высокие требования к качеству окружающей среды, но с течением времени в связи с ослаблением строгости нормативов и систематическим нарушением законодательства, структура каркаса стала несбалансированной. При высоких площадных показателях, на территориях с пониженной экологической емкостью проживает 69% жителей столичного региона;

– природно-экологический каркас Москвы постоянно деградирует как в связи с высоким уровнем урбанизации столичного региона, так и в результате естественных процессов. С 2000 г. площадь территорий, занятых древесно-кустарниковой растительностью, сократилась на 8165 га, (4,2% от состояния на 2000 г.). При этом основное сокращение происходило в последние 5 лет (с 2011 г.);

– столичный регион все еще имеет потенциал для оптимизации природно-экологического каркаса: при сохранении имеющейся структуры возможно создание связных элементов зеленой инфраструктуры, достаточное компенсационное озеленение, ревитализация бывших промышленных зон, восстановление лесов, корректировка текущих градостроительных проектов;

– полноценное применение результатов геоинформационного анализа структуры и динамики при-

родно-экологического каркаса для целей информационного обеспечения экологически устойчивого развития урбанизированных территорий возможно на

базе применения веб-технологий, например, при использовании атласных информационных систем [Яблоков, Тикунов, 2016].

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-17-30009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Абатуров А.В., Браславская Т.Ю., Королева С.Ю. Закономерности динамики еловых насаждений в старолесьях Подмосковья // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1(3). С. 1–3.

Владимиров В.В. Урбэкология. М.: Изд-во МНЭПУ, 1999. 204 с.

Майорова Е.И., Енгальцева А.А. Правовые основы сохранения природного комплекса Москвы // Вестн. Моск. гос. ун-та леса – Лесной вестник. 2015. Т. 19. № 5.

Минин А.А., Сементовская К.В. Оценка состояния зеленых насаждений г. Москвы методами дистанционного зондирования // Проблемы озеленения крупных городов. Мат-лы XVI Междунар. научно-практической конф. 2014. С. 73–77.

Родоман Б.Б. Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. Смоленск: Ойкумена, 1999. 256 с.

Стырин Е.М. Государственное управление на основе открытых данных: перспективы развития. М.: Изд. дом Высшей школы экономики, 2012. 32 с.

Федеральный закон «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ.

Яблоков В.М., Тикунов В.С. Принципы создания атласной информационной системы на базе интернета для устойчивого развития территорий // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2016. № 1. С. 29–38.

Dige G. Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems // European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. 2011. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion> (дата обращения 1.09.2017).

Hansen M.C. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // Science. 2013. V. 342. № 6160. P. 850–853.

Lefebvre A., Sannier C., Corpetti T. Monitoring urban areas with Sentinel-2A data: Application to the update of the Copernicus high resolution layer imperviousness degree // Remote Sensing. 2016. V. 8. № 7. 606 p.

Overmars K.P., De Koning G.H.J., Veldkamp A. Spatial autocorrelation in multi-scale land use models // Ecological modelling. 2003. V. 164. № 2. P. 257–270.

Pesaresi M. et al. Assessment of the added-value of Sentinel-2 for detecting built-up areas // Remote Sensing. 2016. V. 8. № 4. 299 p.

Senaratne H. et al. A review of volunteered geographic information quality assessment methods // International J. Geographical Information Science. 2017. V. 31. № 1. P. 139–167.

World Health Organization et al. Global report on urban health: equitable healthier cities for sustainable development. World Health Organization, 2016.

Поступила в редакцию 03.08.2017
Принята к публикации 13.09.2017

V.M. Yablokov¹

GIS-BASED ANALYSIS OF STRUCTURE AND DYNAMICS OF THE MOSCOW URBAN ENVIRONMENTAL INFRASTRUCTURE USING THE OPEN GEODATA

Methods of GIS-based structure and dynamic spatial analysis of urban environmental infrastructure on the basis of open geodata are described through the example of Moscow. As a result of the study, elements of the Moscow environmental infrastructure were identified using a grid model and the hot-spot analysis method, their parameters have been calculated and maps created. The degree of transformation of the Moscow environmental infrastructure over the past 16 years has been estimated using multi temporal satellite images.

Possibilities of optimization of the Moscow environmental infrastructure, which has an unbalanced spatial structure, have been assessed. Analysis of the dynamics of natural and green areas identified a reduction tendency, because of the natural processes and not eco-friendly decisions in urban planning. Open spatial data provide actual information about the structure and dynamics of environmental infrastructure, to support the sustainable development of urban areas.

Key words: GIS, remote sensing data, quality of the urban environment, green infrastructure, hot-spot analysis.

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 15-17-30009).

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, postgraduate student; e-mail: vasily.yablokov@gmail.com

REFERENCES

- Abaturov A.V., Braslavskaya T.Yu., Koroleva S.Yu.* Zakonomernosti dinamiki elovyh nasazhdenij v staroles'yah Podmoskov'ya [Regularities in the dynamics of spruce plantations in old forests of Moscow suburbs] // *Izv. Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2014. V. 16. № 1(3) P. 1–3. (in Russian).
- Dige G.* Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems // European Environment Agency, Copenhagen, Denmark. 2011. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/green-infrastructure-and-territorial-cohesion> (Accessed 01.09.2017).
- Federal law 10.01.2002 № 7-FZ «On the protection of the environment».
- Hansen M.C. et al.* High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. V. 342. № 6160. P. 850–853.
- Lefebvre A., Sannier C., Corpetti T.* Monitoring urban areas with Sentinel-2A data: Application to the update of the Copernicus high resolution layer imperviousness degree // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. № 7. P. 606.
- Majorova E.I., Engalycheva A.Ya.* Pravovye osnovy sohraneniya prirodnoho kompleksa Moskvy [Legal basis for preserving the natural complex of Moscow] // *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa – Lesnoj vestnik*. 2015. T. 19. № 5 (in Russian).
- Minin A.A., Sementovskaya K.V.* Ocenka sostoyaniya zelenyh nasazhdenij g. Moskvy metodami distancionnogo zondirovaniya [Assessment of the state of green areas in Moscow using the remote sensing methods] // *Problemy ozeleneniya krupnyh gorodov. Mat-ly XVI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konf.* 2014. S. 3–77 (in Russian).
- Overmars K.P., De Koning G.H.J., Veldkamp A.* Spatial autocorrelation in multi-scale land use models // *Ecological modelling*. 2003. V. 64. № . P. 57–270.
- Pesaresi M. et al.* Assessment of the added-value of Sentinel-2 for detecting built-up areas // *Remote Sensing*. 2016. V. 8. № 4. 299 p.
- Rodoman B.B.* Territorial'nye arealy i seti. Ocherki teoreticheskoj geografii [Territorial Areas and Networks. Essays on theoretical geography.]. Smolensk: Ojkumena, 1999. 256 s. (in Russian).
- Senaratne H. et al.* A review of volunteered geographic information quality assessment methods // *International J. Geographical Information Science*. 2017. V. 31. № 1. P. 139–167.
- Styrin E.M.* Gosudarstvennoe upravlenie na osnove otkrytyh dannyh: perspektivy razvitiya [Public administration based on open data: development prospects]. M. : Izd. dom Vysšej shkoly jekonomiki, 2012. 32 s. (in Russian).
- Vladimirov V.V.* Urboekologiya [Urban ecology]. M. : Izd-vo MNePU, 1999. 204 p. (in Russian).
- World Health Organization et al. Global report on urban health: equitable healthier cities for sustainable development. World Health Organization, 2016.
- Yablokov V.M., Tikunov V.S.* Principy sozdaniya atlasnoj informacionnoj sistemy na baze interneta dlya ustojchivogo razvitiya territorij [Principles of creating the Internet-based atlas information system for sustainable development of territories] // *Vestnik Mosk. Un-ta. Ser. 5: Geografiya*. 2016. № 1. S. 29–38 (in Russian).

Received 03.08.2017
Accepted 13.09.2017