

К.В. Захаров¹, А.А. Медведков^{1,2}, Е.Ю. Иванова¹

ТЕХНОЛОГИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ БЛИЖНЕГО ПОДМОСКОВЬЯ)

АННОТАЦИЯ

В статье рассмотрены методологические подходы к созданию технологии геоэкологической оценки урбанизированных территорий на примере двух наиболее динамично развивающихся городских образований северной части Ближнего Подмоскovie – городских округов Мытищи и Химки. В исследовательском отношении данные подходы применены к озеленённым территориям – наиболее значимым в экологическом отношении для урбанизированных зон. В качестве важнейших составляющих рассматриваемой технологии обозначено использование данных дистанционного зондирования и результатов инструментальных исследований. Для оценки интенсивности застройки залесённых и незапечатанных территорий использованы космоснимки Landsat-7 и Landsat-8 (2000, 2010 и 2018 годов), что позволило оценить фрагментацию территорий в границах обозначенных административных образований. Выявлено сокращение площади лесных и открытых местообитаний. Показано сокращение темпов застройки открытых биотопов. Полученные результаты отражены в картографической и статистической формах. В ходе сравнения установлено, что по степени фрагментации север Ближнего Подмоскovie сопоставим с городами Евросоюза. Вторая составляющая геоэкологической оценки базировалась на понимании того, что древесные растения – важный барьер на пути распространения загрязняющих веществ в условиях городской среды. Поэтому данная часть исследования основывалась на эколого-геохимическом изучении городских парков и скверов. В качестве критериев оценки выступили результаты анализа элементного состава листьев берёзы и почвенных образцов, отобранных на озеленённых территориях крупнейших городов северного Подмоскovie. Выявлено, что в образцах почвы, отобранных в локальных понижениях микрорельефа, отмечено превышение ПДК по отдельным элементам (Cu, Pb). Наряду с этим листья берёзы характеризуются относительно низкими значениями анализируемых элементов (Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr). Полученные результаты позволяют удовлетворительно оценивать качество приземного воздуха на озеленённых территориях, выполняющих важную рекреационную функцию.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геоэкологическая оценка, урбанизированные территории, фрагментация ландшафта, Московская область

¹ Московский государственный областной университет, ул. Веры Волошиной, д.24, 141014, г. Мытищи, Московская область, Россия, *e-mail*: coz.prutkoff@yandex.ru; ivelena2010@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, 119991, г. Москва, Россия, *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

Konstantin V. Zakharov¹, Alexey A. Medvedkov^{1,2}, Elena Yu. Ivanova²

**TECHNOLOGY OF GEOECOLOGICAL ASSESSMENT
OF URBANIZED TERRITORIES
(ON THE EXAMPLE OF THE NEAR MOSCOW REGION)**

ABSTRACT

The methodological approaches to create a technology of geoeology assessment of urbanization areas were considered in the article. Mytishi and Khimki urban districts were taken as examples of dynamic development city districts in north part of near Moscow vicinity. These methodological approaches were used to green areas which most important for ecological wellbeing in urban areas. The satellite pictures and results of instrumental investigation were used as importance parts this technology. We used Landsate-7 and Landsate-8 satellite pictures 2000, 2010 and 2018 years and assessed the dynamics different classes of objects and fragmentation these districts. The decrease of forest and open biotopes were showed. The temp development of open biotopes during the period decrease too. The north part of near Moscow vicinity is comparable with cities EU by degree of fragmentation. The trees are important barrier in road to distribution of pollutants in city condition. Therefore, second part of geoeology assessment included ecology-geochemical investigation city parks and squares. The results of analyses chemical elements in birch leaves and topsoil were used as criterion. The samples were taken from green areas of biggest cities northern part Moscow vicinity. We have revealed an excess MAC on Cu and Pb. Nevertheless, there are relatively low contents analyzed elements in (Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr) in birch leaves. Our results well assessed an air quality in lower layer in green areas.

KEYWORDS: geoeological assessment, urbanized areas, landscape fragmentation, Moscow region

ВВЕДЕНИЕ

Особая роль в оценке урбогеосистем отводится изучению актуального состояния лесных и открытых – экологически значимых – территорий на урбанизованных землях. Общеизвестно, что растительный покров выступает в качестве средоформирующего и средозащитного фактора в любом ландшафте, а на городских территориях его роль особенно важна, учитывая выполняемые им социально-значимые функции регулирующего (защита от неблагоприятных природных явлений и возможность рекреационного использования) и культурно-эстетического характера. В настоящее время озеленённые территории в городах Ближнего Подмосковья испытывают возрастающую антропогенную нагрузку в связи с ростом аэротехногенного загрязнения и рекреационного воздействия. Состояние растительного покрова на урбанизованных землях – важнейшее условие, определяющее степень устойчивого функционирования городского ландшафта и формирования комфортной городской среды. Поэтому при геоэкологической оценке городских территорий особое место отводится городским паркам, скверам и открытым биотопам. В качестве важнейших подходов, реализуемых в ходе геоэкологического изучения урбанизованных территорий, значимым представляется симбиоз следующих составляющих: индикация жизненного состояния городского древостоя, эколого-геохимическое изучение депонирующих сред (особенно в парках и скверах), анализ состояния речных долин в черте города (с целью контроля выполняемых ими экологических функций), биоклиматическая оценка городской территории посредством

¹ Moscow State Regional University, Vera Voloshina str., 24, 141014, Mytishchi, Moscow region, Russia, e-mail: coz.prutkoff@yandex.ru; ivelena2010@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, 119991, Moscow, Russia, e-mail: a-medvedkov@bk.ru

привлечения данных тепловой инфракрасной съёмки, пространственный анализ интенсивности застройки лесных и открытых местообитаний, проведение социологических опросов на предмет оценки комфортности и привлекательности городской среды глазами жителей и др. Определённый интерес в рамках подобных исследований представляет также и анализ генеральных планов городов для понимания учёта зелёных насаждений в стратегиях их развития. Представляется, что такой комплексный подход необходим для научно-обоснованного управления экологической ситуацией на интенсивно растущих по людности и застраиваемых урбанизированных территориях.

Выбранный для исследования регион – Московская область – самый плотно населённый (около 170 чел./км²) из площадных субъектов нашей страны. Московскую область по данному относительному показателю опережают только точечные объекты – российские города федерального подчинения. Градостроительное освоение Подмоскovie неразрывно связано с трансформацией экологического каркаса и техногенным изменением ландшафтной структуры в его пределах. В наиболее освоенной части данного региона – Ближнем Подмоскovie, где предпочтение отдаётся многоэтажной застройке, особенно остро стоит проблема обеспеченности озеленёнными территориями [Захаров, 2019]. Так, в ряде городских образований (Химки, Мытищи, Щёлково и др.), доля озеленённых территорий общего пользования имеет значения ниже нормативных¹. Данные тенденции порождают важнейшие экологические вызовы, сформулированные в форме основных природоохранных приоритетов для территории Подмоскovie [Медведков, Ткачёв, 2008].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Несмотря на всю сложность воздействия процессов урбанизации на окружающую среду, проследить их влияние и динамику можно с использованием не только результатов индикационных, инструментальных и статических исследований, но и с привлечением данных дистанционного зондирования. Последнее обстоятельство представляется особенно важным в части проведения сравнительного анализа с территориями-аналогами. Это позволяет осуществлять более широкие сопоставления по формализуемым оценочным показателям, сравнивая выявленные на их основе тренды в разных по людности и выполняемым функциям городах.

В данной работе мы остановимся на сочетании двух методических подходов: обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для оценки степени фрагментации городского ландшафта искусственно созданными рубежами и последующего эколого-геохимического изучения депонирующих сред в крупнейших лесопарках рассматриваемых городских образований (на примере анализа элементного состава листьев зелёных насаждений, отобранных в период активной вегетации).

Для оценки интенсивности застройки экологически «полезных» земель (залесённых и незапечатанных территорий) были использованы космические снимки Landsat-7 и Landsat-8 (2000, 2010 и 2018 годов). В ходе дешифрирования космоснимков выделены 4 класса объектов, позволяющие оценить степень антропогенной трансформации рассматриваемой территории – лес, открытые биотопы, водные объекты и застройка всех типов. Поскольку число классов невелико, и они хорошо различимы, то при дешифрировании использован метод автоматической классификации с обучением [Малышева, 2012]. Дешифрирование проведено в среде QGIS с помощью модуля SCP (Semi-Automatic Classification Plugin). Полученные материалы отредактированы с использованием космоснимков высокого разрешения, доступных в Google Earth Pro, а также свободно распространяемой векторной

¹ Обеспеченность озеленёнными территориями общего пользования (парки, скверы, бульвары и др.): городской округ Химки – 5,4 м²/чел., городской округ Мытищи – 0,03 м²/чел., городское поселение Щёлково – 1,9 м²/чел. при нормативной величине 10 м²/чел. по данным СП 42.13330.2011

карте Open Street Map. Эти же геоинформационные программы использованы для отрисовки значительно менее различимых на космоснимках линейных объектов – речной сети и составляющих транспортной системы.

Территориально в область исследования включены два наиболее динамичных административных образования в северном секторе Ближнего Подмосковья – городские округа Мытищи и Химки. С целью выявления актуальных трендов использованы два показателя: соотношение экологически эффективных площадей и застройки, а также выраженная в процентах скорость их изменения [Rodriguez-Rodriguez et al., 2019]. Для подсчёта ежегодной скорости изменения площади каждого объекта (r) использована специально разработанная методика [Pugetaud, 2003], [Rodriguez et al., 2013]:

$$r = \frac{1}{t_2 - t_1} \times \ln\left(\frac{A_2}{A_1}\right) \times 100^1$$

В качестве второго показателя выбрана степень фрагментации территории искусственными рубежами, процесс, который в конечном итоге влияет практически на все компоненты окружающей среды. В странах Евросоюза данный показатель часто используется на региональном уровне для базовой оценки биоразнообразия. Мы использовали метод «эффективной ячейки», который выражает среднюю площадь нефрагментированного участка m_{eff} в выбранных границах. Результат можно рассматривать как площадь, внутри которой животные могут свободно перемещаться, не встречая рубежей, то есть показатель m_{eff} учитывает как площадные, так и линейные антропогенные объекты. В отличие от безразмерных индексов, m_{eff} имеет размерность, что позволяет сравнивать разные по площади территории². В качестве рубежей мы учитывали застройку всех типов и транспортные коммуникации; в качестве местообитаний – лесные и открытые биотопы. Показатель m_{eff} рассчитывается по формуле:

$$m_{\text{eff}} = \left(\left(\frac{A_1}{A_{\text{total}}} \right)^2 + \left(\frac{A_2}{A_{\text{total}}} \right)^2 + \left(\frac{A_3}{A_{\text{total}}} \right)^2 + \dots + \left(\frac{A_n}{A_{\text{total}}} \right)^2 \right) \times A_{\text{total}}^3$$

Помимо анализа ДДЗ, в наиболее плотно заселённых городах Московской области (на примере городских округов Мытищи и Химки) произведена оценка качества воздуха в городских лесопарках на основе анализа элементного состава листьев зелёных насаждений (берёзы, отличающейся хорошо выраженной способностью к аккумуляции тяжёлых металлов), отобранных в конце периода активной вегетации. Также из верхних органогенных горизонтов отбирались образцы почвы. Пробы отбирались в естественных понижениях микрорельефа – потенциальных накопителях загрязняющих веществ. Из отобранных образцов почвы была взята вытяжка 1 М HNO₃, а собранные листья берёзы были высушены, а затем озолены в муфельной печи при температуре 400–500 °С. Последующее определение микроэлементного состава (Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr) производилось на атомно-абсорбционном спектрометре.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа ДДЗ с 2000 по 2018 годы показали преобладание двух классов объектов – залесённых территорий и застройки, причём если в 2000 году преобладал лес, то к 2018 году наибольшую площадь заняла застройка. При этом площадь водных объектов

¹ A_1 и A_2 – площадь каждого класса объектов в начале (t_1) и в конце (t_2) рассматриваемого периода

² Если территория полностью застроена, то $m_{\text{eff}} = 0$, а если территория не разделена искусственными рубежами, то $m_{\text{eff}} = e^{\text{е}}$ площади

³ A_i – площадь участков ($i = 1, \dots, n$), A_{total} – общая площадь, n – число участков

осталась неизменной [Захаров, 2018]. Результаты расчёта ежегодной скорости изменения площади каждого класса объектов по двум муниципальным образованиям сведён в таблицу.

Табл. 1. Ежегодная скорость изменения площади застройки, лесных и открытых биотопов в период с 2000 по 2018 годы (%)

Table 1. Annual speed of transformation building areas, forests and open biotopes from 2000 till 2018 years (%)

Городской округ	2000–2010			2010–2018			2000–2018		
	лес	открытые биотопы	застройка	лес	открытые биотопы	застройка	лес	открытые биотопы	застройка
Мытищи	-0.55	-5.03	3.58	-0.70	-0.57	1.83	-0.62	-4.20	2.80
Химки	-1.07	-2.40	1.10	-0.49	-0.42	0.29	-0.82	-1.52	0.74

Из полученных результатов может показаться, что темпы застройки и потери площади открытых биотопов в 2010–2018 годах снизились по сравнению с 2000–2010 годами, тогда как скорость потери лесных биотопов выросла. Для проверки результатов проведён U-тест Манна-Уитни, позволяющий оценить различия в сверхмалых выборках. Расчёты проведены в программе Statistica 6.0. Результаты подтвердили статистически достоверное изменение скорости изменения площади только для открытых биотопов ($p=0.046$).

Полученные результаты дистанционного анализа динамики биотопов представлены в картографическом виде (рис. 1 и 2).

Показатели фрагментации, рассчитанные для каждого муниципального образования по приведенной выше формуле сведены в таблицу.

Табл. 2. Показатель m_{eff} (km^2) для каждого городского округа и всей рассматриваемой территории

Table 2. The m_{eff} index (km^2) for each city district and all considered territory

Городской округ	2000 год	2010 год	2018 год
Мытищи	8.74	6.83	5.62
Химки	5.03	3.41	3.04

Вторая составляющая геоэкологической оценки базировалась на понимании того, что древесные растения – важный барьер на пути распространения загрязняющих веществ в условиях городской среды. Поэтому данная часть исследования основывалась на эколого-геохимическом изучении городских парков и скверов. Все изучаемые объекты располагаются в зоне воздействия крупных транспортных автомагистралей. Ощутимые локальные источники загрязнения отсутствуют, поэтому представляется, что основная часть загрязняющих веществ на озеленённые территории поступает за счёт атмосферных выпадений. В связи с этим в качестве основных критериев оценки нами принимаются

результаты проведённых лабораторных исследований. Данные результаты основаны на анализе элементного состава листьев берёзы и почвенных образцов, отобранных на озеленённых территориях крупнейших городов северного Подмосквья. Выявлено, что в образцах почвы, отобранных в локальных понижениях микрорельефа, отмечено превышение ПДК по отдельным элементам (Cu, Pb). Фрагментарно результаты лабораторного исследования отражены на рис. 3 и 4. Наряду с этим, листья берёзы характеризуются относительно низкими значениями анализируемых элементов (Cu, Zn, Pb, Cd, Ni, Cr, Sr). Полученные результаты позволяют удовлетворительно оценивать качество приземного воздуха на озеленённых территориях, выполняющих важную рекреационную функцию.

БИОТОПИЧЕСКАЯ СХЕМА СЕВЕРНОГО СЕКТОРА БЛИЖНЕГО ПОДМОСКОВЬЯ

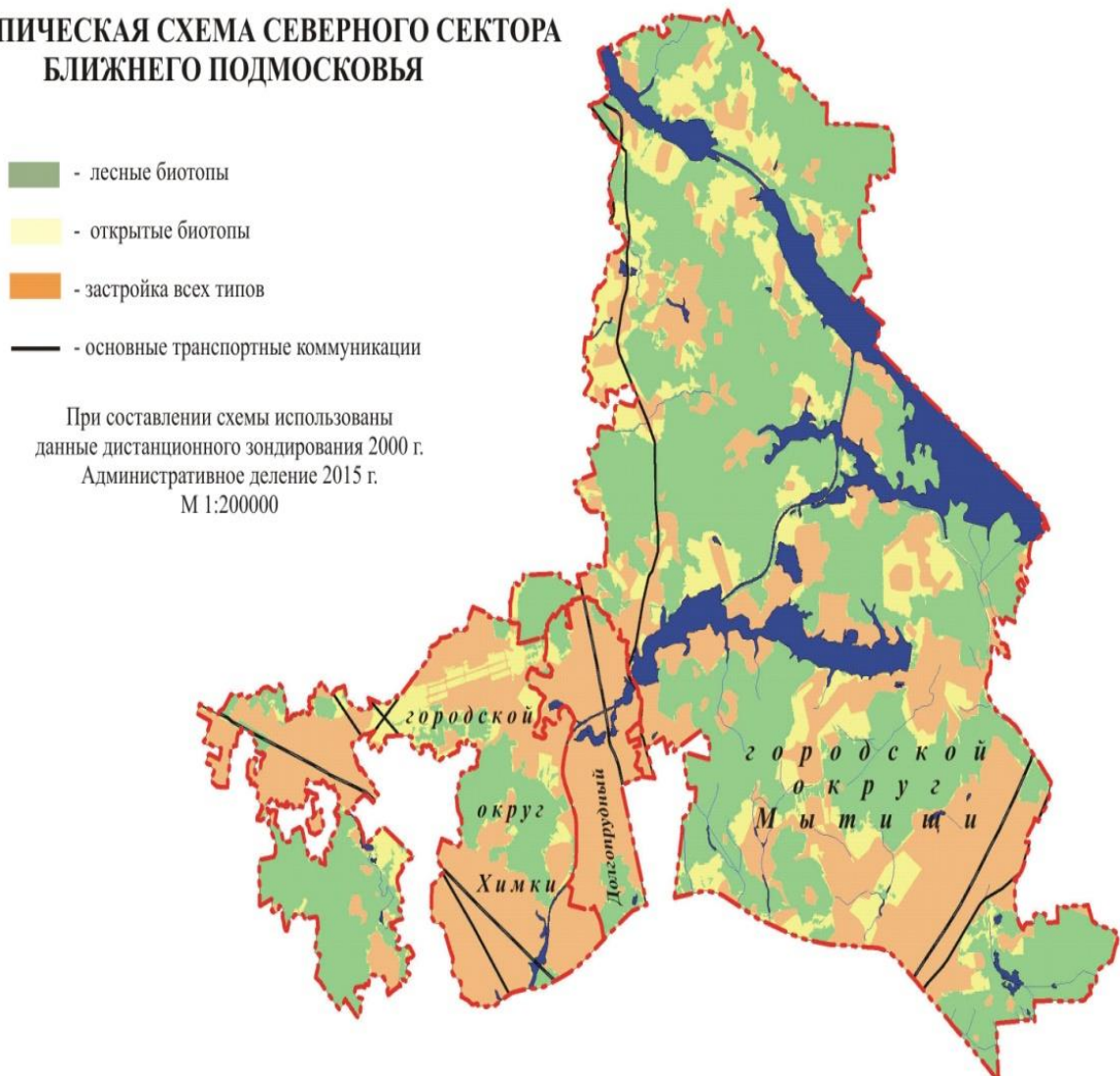


Рис. 1. Биотопическая схема северного сектора Ближнего Подмосквья (составлена по данным на 2000 год)

Fig. 1. Biotopic scheme of the northern sector of Near Moscow region (compiled according to data for 2000)

**БИОТОПИЧЕСКАЯ СХЕМА СЕВЕРНОГО СЕКТОРА
БЛИЖНЕГО ПОДМОСКОВЬЯ**

- лесные биотопы
- открытые биотопы
- застройка всех типов
- основные транспортные коммуникации

При составлении схемы использованы
данные дистанционного зондирования 2018 г.
Административное деление 2015 г.
М 1:200000

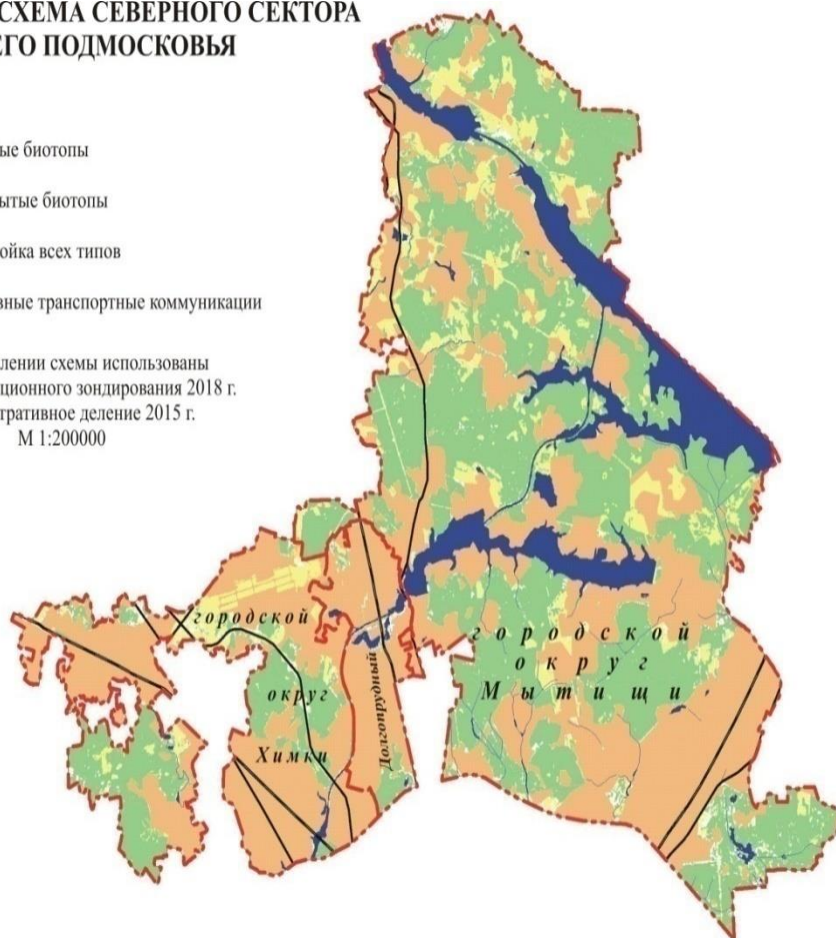


Рис. 2. Биотопическая схема северного сектора Ближнего Подмосквья
(составлена по данным на 2010 год)

Fig. 2. Biotopic scheme of the northern sector of Near Moscow region
(compiled according to data for 2010)

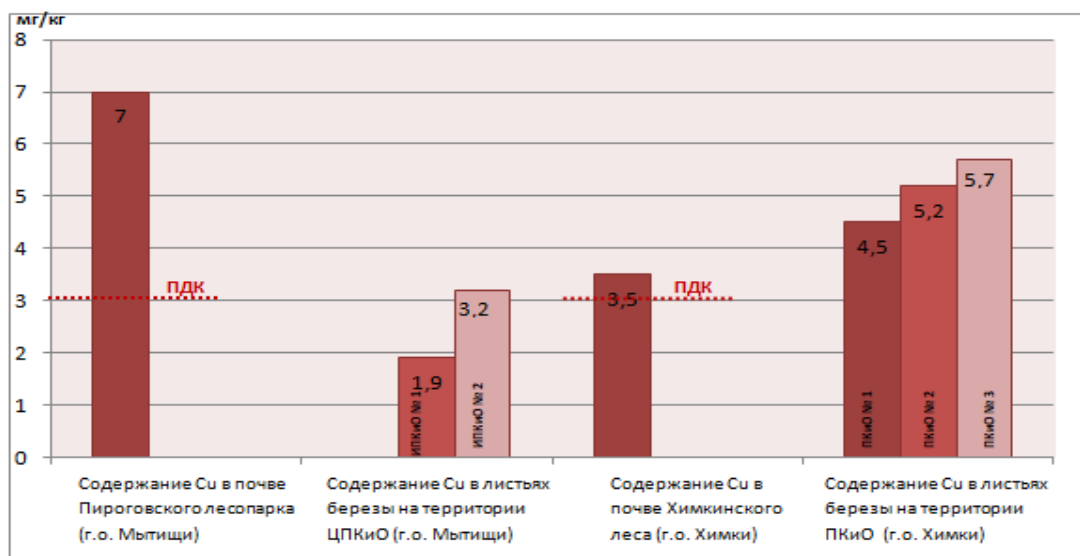


Рис. 3. Содержание Cu в листьях берёзы и органометных горизонтах почвы озеленённых территорий городских округов Мытищи и Химки

Fig. 3. Cu content in the birch leaves and organogenic soil horizons in green areas of Mytishi and Khimki urban districts

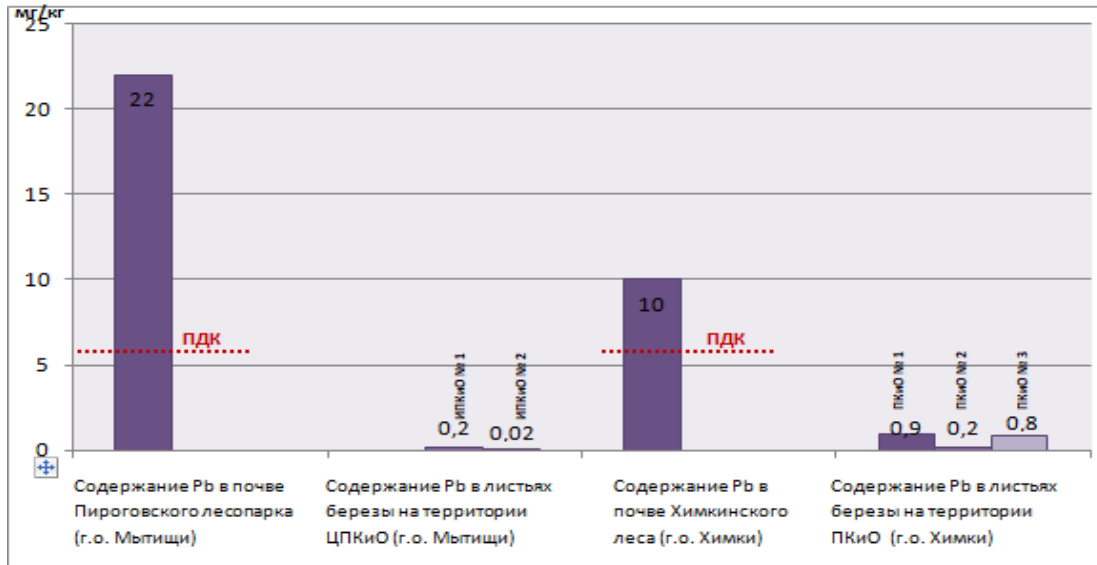


Рис. 4. Содержание Pb в листьях берёзы и органогенных горизонтах почвы озеленённых территорий городских округов Мытищи и Химки
 Fig. 4. Pb content in the birch leaves and organogenic soil horizons in green areas of Mytishi and Khimki urban districts

ВЫВОДЫ

Оценка фрагментации может рассматриваться как один из подходов по геоэкологической оценке урбанизированных территорий. Это необходимо не только для понимания динамики экологически «полезных» и экологически «вредных» земель, но и для разработки сценарных моделей по развитию экологической ситуации в ближайшем будущем. Как следует из полученных материалов, фрагментация территории увеличивалась как в период с 2000 по 2010 годы, так и с 2010 по 2018 годы. Интерпретация такого рода материалов имеет определённую сложность, поскольку довольно непросто установить связь между количественными территориальными характеристиками и экологическими процессами [Li, Wu, 2004]. В связи с этим нередко прибегают к сравнению с аналогичными показателями, рассчитанными для других территорий. Так, показатель m_{eff} , рассчитанный для Праги, составил 3,98 км², Берлина – 2,46, Брюсселя – 0,73¹. Таким образом, рассматриваемые муниципальные образования по степени фрагментации ландшафта вполне сравнимы с хозяйственно освоенными городами Европейского союза [Miller et al., 2009; Jaeger, 2002]. Однако в городах Европейского союза успешно реализуются подходы по управлению транспортными потоками с целью снижения аэротехногенной нагрузки на городскую среду (в том числе и на территории, выполняющие важные экологические функции). В зависимости от степени реализации данных подходов зависит и состояние экологически «полезных» земель. Поэтому для получения более полного представления о сложившейся ситуации следует также использовать данные о накоплении загрязняющих веществ в депонирующих средах городского ландшафта. Совмещение обозначенных подходов позволит давать более объективные оценки (в том числе и сравнительного характера) по современному состоянию озеленённых территорий и иметь более полное представление о степени использования ими своего ассимиляционного потенциала в условиях складывающейся аэротехногенной нагрузки. Таким образом, в городах Ближнего Подмосковья антропогенная нагрузка на озеленённые территории

¹ ЕЕА. Landscape fragmentation in Europe. ЕЕА Report N 2/2011. Copenhagen: European Environment Agency. 87 р.

увеличивается, а их буферная ёмкость снижается, чему способствует также и прогрессирующая фрагментация городского ландшафта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-45-500894.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was carried out with the financial support of the RFBR, grant No 17-45-500894.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Захаров К.В.* Отличия в интенсивности застройки открытых и залесённых территорий северного сектора Ближнего Подмоскovie. Актуальные проблемы биологической и химической экологии. Мытищи: МГОУ, 2019. С. 134–138.
2. *Мальшиева Н.В.* Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: Издательство МГУЛ, 2012. 154 с.
3. *Медведков А.А., Ткачёв А.Ю.* Актуальные приоритеты охраны природы в Московской области. Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Естественные науки, 2018. № 2. С. 42–50. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-2-42-50.
4. *Jaeger J.A.G.* Landschaftszerschneidung: Eine transdisziplinäre Studie gemäß dem Konzept der Umweltgefährdung. Stuttgart: Ulmer, 2002. 447 p.
5. *Li H.B., Wu J.G.* Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, 2004. № 19. P. 389–399.
6. *Miller J.R., Snyder S.A., Skibbe A.M., Haight R.G.* Prioritizing conservation targets in a rapidly urbanizing landscape. *Landscape and urban planning*, 2009. № 93. P. 123–131. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2009.06.011.
7. *Puyravaud J.-P.* Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 2003. № 177. P. 593–596.
8. *Rodríguez Erazo N., Armenteras-Pascual D., Retana Alumbroeros J.* Land use and land cover change in the Colombian Andes: Dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, 2013. № 8 (2). P. 154–157.
9. *Rodríguez-Rodríguez D., Martínez-Vega J., Echavarría P.* A twenty years GIS-based assessment of environmental sustainability of land use changes in and around protected areas of a fast-developing country: Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019. № 74. P. 169–179.

REFERENCES

1. *Jaeger J.A.G.* Landschaftszerschneidung: Eine transdisziplinäre Studie gemäß dem Konzept der Umweltgefährdung (Landscape fragmentation: A transdisciplinary study according to the concept of environmental hazard). Stuttgart: Ulmer, 2002. 447 p. (in German).
2. *Li H.B., Wu J.G.* Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, 2004. No 19. P. 389–399.
3. *Malysheva N.* Automated interpretation of aerospace images of forest plantations. Moscow: Moscow State Forest University Press, 2012. 154 p. (in Russian).
4. *Medvedkov A., Tkachyov A.* Actual priorities of nature protection in the Moscow region. *Bulletin of Moscow Region State University. Series: Natural sciences*, 2018. No 2. P. 42–50. DOI: 10.18384/2310-7189-2018-2-42-50 (in Russian).
5. *Miller J.R., Snyder S.A., Skibbe A.M., Haight R.G.* Prioritizing conservation targets in a rapidly urbanizing landscape. *Landscape and urban planning*, 2009. No 93. P. 123–131. DOI :10.1016/j.landurbplan.2009.06.011.
6. *Puyravaud J.-P.* Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 2003. No 177. P. 593–596.

7. *Rodríguez Erazo N., Armenteras-Pascual D., Retana Alumbros J.* Land use and land cover change in the Colombian Andes: Dynamics and future scenarios. *Journal of Land Use Science*, 2013. No 8 (2). P. 154–157.
 8. *Rodríguez-Rodríguez D., Martínez-Vega J., Echavarría P.* A twenty years GIS-based assessment of environmental sustainability of land use changes in and around protected areas of a fast-developing country: Spain. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019. No 74. P. 169–179.
 9. Zakharov K. The difference in intensity of development opened and forested biotopes in northern sector of Near Moscow region. *Actual problems of biological and chemical ecology*. Mytishchi: Moscow State Regional University, 2019. P. 134–138 (in Russian).
-