

УДК 574.42

## ОЦЕНКА И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЦЕНОТИЧЕСКОГО РАЗНООБРАЗИЯ ЛЕСОВ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА<sup>1</sup>

© 2022 г. Т. В. Черненкова<sup>а</sup>, \*, И. П. Котлов<sup>б</sup>, Н. Г. Беляева<sup>а</sup>, Е. Г. Сулова<sup>с</sup>, О. В. Морозова<sup>а</sup><sup>а</sup>Институт географии РАН, Старомонетный пер., д. 29, Москва, 119017 Россия<sup>б</sup>Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова, Ленинский пр-кт, д. 33, Москва, 119071 Россия<sup>с</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

\*E-mail: chernenkova50@mail.ru

Поступила в редакцию 14.03.2022 г.

После доработки 14.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Растущая плотность населения крупных мегаполисов придает биоразнообразию лесного покрова все большую экологическую и социальную значимость. Отсутствие актуальных картографических материалов затрудняет оценку качества природной среды и сохранение ценных природных объектов с учетом условий местообитаний и видов землепользования. Целью работы является выявление и картографирование ценотического разнообразия лесного покрова Московского региона. Для изучения пространственной структуры сообществ использованы дистанционные данные (Sentinel-2A, радарные снимки PALSAR), цифровые модели рельефа (ЦМР SRTM) в сочетании с данными наземных исследований. Для компенсации дефицитного и неравномерного распределения полевых данных применен подход выравнивания обучающей выборки с подбором оптимального алгоритма моделирования ("случайный лес"). Разработаны картографические модели современного фитоценотического разнообразия лесного покрова Московского региона для тематических единиц в ранге формации (11 классов) и группы ассоциаций (31 класс), сопровождаемые подробной легендой. Статистические методы и цифровой формат картографических материалов определяют адаптивность подхода и необходимую актуализацию материалов. Предлагаемая методика картографирования и выполненная оценка типологического разнообразия лесов могут быть использованы для создания пространственной основы мониторинга биоразнообразия лесов Московской области и городских лесов Москвы.

*Ключевые слова:* фитоценотическое разнообразие, лесной покров, картографирование, Sentinel, ЦМР SRTM, алгоритм случайного леса, Московский регион.

DOI: 10.31857/S0024114822060043

Лесной покров выступает ключевым ресурсом для поддержания устойчивого состояния природной среды, выполняя функции регулирования температуры, очищения воздуха, связывания углерода и поддержания биоразнообразия (Мониторинг биологического разнообразия ..., 2008; Abad-Segura et al., 2020). Биоразнообразие, в свою очередь, является одной из экосистемных услуг, обладающих внутренней ценностью (Ghilarov, 2000; Lutz et al., 2001; Reyers et al., 2012). Выявление ценотического разнообразия лесов имеет решающее значение при оценке качества растительного покрова, сохранения ценных природных объектов, организации мониторинга и ландшафтного планирования территории (Рысин, Савельева, 1980). При неоспоримой значимости лесов тем не менее актуальная лесостроительная информация (на период менее 10 лет)

имеется лишь для 15% площади лесов России (Барталев, Стыценко, 2020). Особенно остро эта проблема стоит для территорий крупных мегаполисов, где ресурсная значимость лесной продукции отходит на второй план.

В настоящее время научное сообщество продвинулось далеко вперед в изучении состава насаждений в городской и пригородной среде с применением спутниковых снимков высокого разрешения (Haase et al., 2019; Wang et al., 2019), LiDAR (Light Detection and Ranging) (Haase et al., 2019), аэрофотоснимков (АФС) (Reyers et al., 2012) и цифровых наземных изображений (Jiang et al., 2017). В относительно узкой области совмещения спутниковых и полевых данных арсенал техник и методов многообразен, однако решающее значение на качество выходных данных оказывает не столько сложность и новизна применяемых методов, сколько систематизированный сбор полевой информации, ее проверка, верификация и адек-

<sup>1</sup> Работа выполнена по теме ИГ РАН № 0148-2019-0007.

ватная подготовка в качестве обучающей выборки для классификации либо моделирования (Gillespie et al., 2008).

Важной проблемой является частота и регулярность расположения пробных площадей, необходимость которых определяется совместной обработкой наземных наблюдений и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Ограниченная выборка (пространственная и временная) часто не может полностью охватить динамику и пространственную неоднородность лесного покрова (Baines et al., 2020). Для России это является достаточно актуальной проблемой, поскольку размещение пробных площадей осуществляется в основном на нерегулярной основе. Их плотность в пересчете на единицу площади как минимум в 6 раз меньше, чем таковая в рамках системы за рубежом на основе регулярных сетей участков National Forest Inventories (NFI), а пространственное распределение имеет сильные сдвиги к дорожной сети и населенным пунктам либо, напротив, к особо охраняемым природным территориям (ООПТ). При этом известно, что минимальный объем выборки для построения статистических зависимостей – 20 элементов, а оптимальное число, по различным оценкам, варьирует от 50 до 80 (Lisovsky et al., 2020).

Для оценки ценотического разнообразия лесного покрова, помимо качества источников данных, требуется соответствующая их подготовка и использование единых принципов классификации. Большое число региональных классификационных систем, выполненных на различных основаниях, вызывает затруднения как в отнесении описываемых сообществ к синтаксонам определенного ранга, так и при сравнении их между собой в процессе анализа ботанико-географических связей. На это неоднократно указывалось рядом исследователей (Нешатаев, 2001; Черненькова, Морозова, 2017; Плугатарь и др., 2020). Наконец, важным условием является применение единых алгоритмов моделирования, определяемых степенью изученности территории и требуемой детальностью дешифрирования природных объектов.

Большинство отечественных работ по изучению типологического разнообразия и крупномасштабному картографированию лесов осуществлялись методом совмещения полевых исследований с лесотаксационными планами, топографическими картами и аэрофото- и космоснимками (Сирин и др., 2014; Разумовская, 2018; Васильев и др., 2019; Волкова, Храмцов, 2019; Семенищенков, Корсиков, 2020 и др.). Использование автоматизированных подходов на основе ДДЗ и материалов наземных исследований встречается реже (Нешатаев, Нешатаев, 2012; Neshataeva et al., 2012; Рыжкова и др., 2015; Черненькова и др., 2019; Груммо и др., 2019), в том числе для оценки рас-

пределения типологических единиц высокого ранга – уровня классов формаций (Ершов и др., 2015; Мелкий и др., 2019).

В Московской области работали известные научные коллективы под руководством таких ученых, как А.А. Алехин, Л.П. Рысин, С.Ф. Курнаев, Н.В. Дылис, Ю.Д. Абатуров, и многие другие, заложившие более полувека назад основы биогеоценотических комплексных исследований на стационарах и биостанциях, а также на ООПТ. В итоге накоплен большой объем геоботанических исследований, разработана карта Растительности Московской области под редакцией Г.Н. Огуреевой (1996). Опираясь на колоссальный опыт отечественных фундаментальных знаний в области типологии, экологии и динамики лесов, современные исследователи осознают необходимость их синтеза и дальнейшего развития с учетом развивающихся технологий.

Несмотря на относительно большой объем оригинальных полевых описаний в Московском регионе, они характеризуются дефицитным и неравномерным распределением. Это обуславливает разный объем типологических единиц и точность их выявления (Kotlov, Chernenkova, 2020). Исключительная сложность организации лесного покрова, представленного сукцессионной мозаикой сообществ с полидоминантным составом древесного яруса или монодоминантными лесами искусственного происхождения, существенно затрудняет типизацию сообществ. В этой связи при выявлении ценотического разнообразия лесного покрова на максимально возможном по детальности пространственном уровне мы старались компенсировать эти проблемы созданием равномерной обучающей выборки, подбором оптимального алгоритма моделирования и совершенствованием методов, ориентированных в первую очередь на статистическую обработку данных.

Целью данного исследования является выявление и картографирование ценотического разнообразия лесного покрова Московского региона с использованием наземных описаний и открытых спутниковых данных. Работа направлена на развитие системы паспортизации лесов, включающей классификацию и картографирование ценотического разнообразия лесного покрова на цифровой основе и обеспечивающей пространственную основу для мониторинга и ландшафтного планирования территории Московской области и городских лесов Москвы.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

### *Район исследований*

Московский регион расположен в центральной части Восточно-Европейской (Русской) равнины – 35°10'–40°15' в.д., 54°12'–56°55' с.ш., за-

нимает площадь 4.58 млн га. Район исследования включает территорию Новой Москвы площадью 0.15 млн га.

Лесной покров исследуемой территории на протяжении нескольких столетий испытывал сильное антропогенное воздействие (вырубка, распашка земель). В первой половине 20 века и особенно активно после Великой Отечественной войны (1941–1945 гг.) произошла значительная смена направления воздействия — активное создание лесных культур (главным образом сосны и ели) на месте бывших пахотных земель, благодаря чему сильно выросла лесистость региона. В 1947 г. все леса Московской области были признаны зеленой зоной, исключая промышленные рубки. Однако вплоть до конца 20 века в регионе происходило наращивание темпов промышленного развития — строительство и эксплуатация машиностроительных заводов и сопутствующей инфраструктуры, включая предприятия энергетического и нефтеперерабатывающего комплексов (Vergel et al., 2019). Это привело к росту выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и гидросферу. В начале 21 века направление воздействия сменилось на постиндустриальное. В связи с развитием финансового сектора экономики начался прирост населения, строительство жилищного фонда, новых автомагистралей (Lurie et al., 2015; Nefedova, Mkrtchan, 2017). Кроме того, зафиксировано ухудшение объема лесохозяйственных мероприятий, направленных на поддержание устойчивости лесных насаждений. Отмечены крупные вспышки инвазий вредителей леса, лесные пожары, в том числе вследствие нарушения природоохранного режима — несанкционированные рубки, свалки бытовых и промышленных отходов (Лесной план ..., 2018).

Тем не менее защитный статус лесов (ограничение промышленных рубок и рубок ухода) способствовал определенной сохранности лесов региона с возможностью осуществления естественной биогенных циклов, формирования естественной структуры и сукцессионной динамики. В пределах большинства ООПТ сохранились отдельные участки коренных сообществ. Несмотря на близость к крупнейшему мегаполису Москве и высокую долю лесов искусственного происхождения, лесной покров территории с точки зрения флористического богатства и типологического разнообразия приближается к составу коренных сообществ широколиственно-хвойной зоны (Chernenkova et al., 2020).

#### *Источники дистанционных данных*

В качестве источника ДДЗ взяты мультиспектральные данные спутника Sentinel-2A, обладающие высокой периодичностью съемки (1 раз в 5 дней), достаточно высоким пространственным разрешением (до 10 м/пиксель), широкой полосой съемки (290 км) и наличием нескольких инфра-

красных каналов и каналов “красный край” (Red Edge). Использовались снимки, выполненные при благоприятных погодных условиях в июне и июле 2021 г. Изображения (в количестве 28) агрегированы до разрешения 60 метров и соединены в бесшовную мозаику. В составе мозаики задействованы 11 спектральных каналов, с использованием которых рассчитан 41 спектральный индекс, включая индексы, оцененные как чувствительные к стрессовому состоянию растительности (Abdullah et al., 2019). Для повышения качества модели использованы данные радарного спутника ALOS Palsar-2 — два слоя согласованной HH и перекрестной HV-поляризации (Shimada et al., 2014). Кроме того, в анализе применяли цифровую модель рельефа SRTM и 10 морфометрических характеристик, рассчитанных на ее основе. В общей сложности получены 63 растровых слоя.

Для снятия автокорреляции использован метод удаления высоко скоррелированных слоев по границе отсечения 0.5. В результате оставлено 7 слоев, которые имели парные корреляции не более 0.5: каналы голубой (2) и красный край (6), индексы NDWI2, BNDWI, GLI, абсолютная высота и согласованная поляризация HH (Таблица 1).

#### *Наземные описания и классификация*

Геоботанические описания общим числом 1684 выполнены по стандартной методике в пределах растительных сообществ, однородных по общему флористическому составу, составу доминантов каждого яруса, структуре сообществ и условиям местообитания, на пробных площадях 20 × 20 м с использованием GPS-позиционирования. Оценивали состав и структуру древесного яруса (проективное покрытие крон, среднюю высоту взрослых деревьев и подроста). Выявлялся полный видовой состав кустарникового, травяно-кустарничкового и мохового ярусов с оценкой проективного покрытия (ПП) в процентах.

При классификации описаний использован эколого-фитоценотический подход (Черненкова, Морозова, 2017; Черненкова и др., 2020). Ряд причин объясняет применение данной классификации: 1) хорошее соответствие типологических и картографируемых единиц; 2) соответствие российским единицам лесной типологии, учитывающим базу нормативно-правовых документов и регулирующих вопросы лесопользования, в целом землеустройства и кадастрового учета земель; 3) иерархичность используемых единиц; 4) учет редких типов лесных сообществ, а также вторичных сообществ, что важно с природоохранной точки зрения.

Для формальной проверки классификации применен линейный пошаговый дискриминантный анализ в программе IBM SPSS Statistics 12.

**Таблица 1.** Растровые слои пространственных характеристик с парными корреляциями менее 0.5

№	Характеристики	Описание	Характеристики
1	B02 – Blue	Чувствительность к старению растений, каротиноидам, побурению и почвенному фону; атмосферная поправка (аэрозольное рассеяние)	458–522 нм
2	B06 – Red Edge	Положение красного края, атмосферная коррекция; извлечение аэрозольной нагрузки	733–747 нм
3	NDWI2	Нормализованный разностный водный индекс. Подчеркивает влажность местообитаний (Shimada et al., 2014)	$\frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}}$
4	BNDWI	Нормализованный разностный индекс голубого и инфракрасного каналов. Связь с индексом листовой пластины и объемом сухой биомассы (Abdullah et al., 2019; Hancock, Dougherty, 2007)	$\frac{\text{NIR} - \text{BLUE}}{\text{NIR} + \text{BLUE}}$
5	GLI	Зеленый листовой индекс. Характеристики хлорофилла и листовой поверхности на основе каналов видимого спектра (Abdullah et al., 2019; Gobron et al., 2000)	$\frac{2 \times \text{Green} - \text{Red} - \text{Blue}}{2 \times \text{Green} + \text{Red} - \text{Blue}}$
6	DEM SRTM (высота)	Положение относительно водоразделов и долин водотоков, ледниковые и водноледниковые ландшафты (Puzachenko и др., 2014).	Метры
7	HH Palsar	Текстурная неоднородность кроновой поверхности, высота древесного яруса, запас биомассы (Shimada и др., 2014)	Условные единицы

В качестве переменных предикторов использованы значения покрытий видов древостоя и сумма покрытий видов, относящихся к определенной эколого-ценотической группе (ЭЦГ). Отнесение видов к ЭЦГ выполнено по модифицированной схеме В.Э. Смирнова с соавторами (2006) с учетом диагностических видов классов растительности в системе Браун-Бланке (Ермаков, 2012; Mucina et al., 1993).

#### *Предварительная подготовка обучающей выборки*

С опорой на предыдущий опыт картографирования лесов (Chernenkova et al., 2020; Kotlov, Chernenkova, 2020) выполнена предварительная подготовка обучающей выборки. Как было указано выше, основной проблемой моделирования на региональном уровне является недостаток точек полевых описаний. В нашем исследовании эту проблему решали методом оцифровки выделов по разносезонным высокодетальным изображениям в программе SASPlanet. Оцифровывали выделы, соответствующие определенному типу сообщества ранга группы ассоциаций, границы которых четко читались по различным снимкам и подтверждались полевыми наблюдениями. Средняя площадь выдела составила 1.81 га, общая площадь оцифрованных выделов – 667.4 га. Итоговое среднее число пикселей каждого тематического класса для обучающей выборки – 122.

Построенная модель типов лесных сообществ в ранге группы ассоциаций дополнительно отфильтрована по маске леса Global Forest Watch (Hansen et al., 2013). С этой целью использован слой лесопокрытой площади и отсечены участки с площадью покрытия лесного участка менее 30 м. Кроме того, отсечены участки, на которых выявлены лесопотери различного генезиса. Такая методика рекомендована авторами продукта Global Forest Watch (Hansen et al., 2013). Слои нелесных и непокрытых лесом территорий отфильтрованы соответственно по обратной нелесной маске. Слои сельхозугодий, водных объектов и населенных пунктов подготовлены с использованием данных OpenStreetMap (Haklay, Weber, 2008).

#### *Алгоритм моделирования*

Для моделирования пространственной структуры лесного покрова выбран алгоритм машинного обучения случайный лес, являющийся частным случаем метода “деревьев решений” (Grabska et al., 2020). Это разновидность ансамблевого алгоритма, называемого бэггингом (Gislason et al., 2004). Использовано программное обеспечение Orfeo Toolbox (Inglada, Christophe, 2009).

Для подбора оптимальных параметров моделирования и выработки наилучшей модели применен способ калибровки на основе тестовой вы-

борки. От исходного объема описаний в качестве тестовой выборки использовали не участвовавшие в моделировании 30% описаний. Тестовую выборку готовили методом случайного стратифицированного отбора. Эффективность использования тестовых выборок показана для методов моделирования ДДЗ (Lyons et al., 2018), в частности, в случае применения алгоритма случайного леса (Joelsson et al., 2006). Таким образом, выбранный подход калибровки позволил для каждого качественного и количественного показателя лесных сообществ, а также набора ДДЗ выявить и устранить недостатки моделей и подобрать наилучшим образом параметры алгоритмов. Это обеспечило более высокую точность моделирования на основе максимально независимой калибровки. Доля точек тестовой выборки, для которых правильно определена принадлежность к моделируемому типу, называется *сходимость типа*, общая доля правильно определенных типов — *общая сходимость*. Общее качество моделирования оценивалось двумя матрицами неточностей для разного уровня детальности пространственных единиц в ранге формаций и групп ассоциаций, алгоритм которого детально изложен в более ранней работе (Kotlov, Chernenkova, 2020). Названия видов сосудистых растений приведены по С.К. Черепанову (1995), мхов — по М.С. Игнатову и Е.А. Игнатовой (2003).

#### Построение карты

Картографирование ценотического разнообразия растительного покрова — это результат совместного анализа выделенных дешифрируемых классов, полученных на основе характеристик из полевых описаний лесных сообществ и внешних переменных среды. Заключительным этапом является построение карты лесного покрова на основе перевода результатов интерполяции дешифрируемых классов в векторный формат с фильтрацией объектов площадью в один пиксель и оформление легенды.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

#### *Классификация и составление легенды к карте лесов Московского региона*

При классификации полевых описаний лесных сообществ выделены синтаксономические единицы в ранге группы ассоциаций (табл. 2). Подробная характеристика синтаксонов с точки зрения их состава и структуры, происхождения, а также зависимости типов лесных сообществ от условий экотопа изложена в предыдущей работе (Черненкоова и др., 2020). Исследование показало, что лесной покров территории представлен сукцессионной мозаикой с большой долей вторичных мелколиственных лесов и хвойных насаждений ис-

кусственного происхождения (Chernenkova et al., 2020). Наличие активно протекающих аллогенных и автогенных сукцессий, сложный полидоминантный состав древесного яруса и сочетаний неморальных и бореальных групп видов в подчиненных ярусах крайне затруднили классификацию лесных сообществ как при первичной обработке описаний, так и по спутниковым изображениям, объективно понижая точность оценки и однозначной интерпретации данных.

Результаты линейного пошагового дискриминантного анализа показали, что по видовому составу с наилучшим качеством (87.0%) выделяются сероольховые леса (гр. 31). Это объясняется доминированием ольхи серой (*Alnus incana*) в древостое только в этой группе ассоциаций. С высокой точностью выделяются черноольховые леса (гр. 32) (96.4%) в силу приуроченности черноольховых к влажнотравно-широколистным сообществам и к гидроморфным условиям в поймах рек и озерных котловин (Морозова и др., 2021). Хорошо дискриминируются также дубовые и липовые широколиственные леса (гр. 19 и 20) — 86.0 и 82.1% соответственно. Осиновые широколиственные сообщества (гр. 29), еловые сообщества (гр. 1 и 4), сосновые (гр. 16, 18) и березняки разнотравные (гр. 27) выделяются с меньшей точностью в диапазоне 62–80%.

Хуже всего (в диапазоне 20–37%) определяют елово-мелколиственные мелколистственные сообщества (гр. 6), сосново-еловые кустарничковые мелколистственные зеленомошные (гр. 9), сосновые мелколистственные широколиственные (гр. 15) и сосновые разнотравные (гр. 17). В случае смешанного состава древостоя это объясняется варьированием соотношения доминантов и отнесением отдельных сообществ к близким монодоминантным группам. Например, в случае елово-мелколиственных лесов (гр. 6) большая их часть отнесена к еловым мелколистственным сообществам (гр. 2), а в случае сосново-еловых (гр. 9) — к сосновым кустарничково-мелколиственным зеленомошным (гр. 13). Сосновые мелколистственные широколиственные леса (гр. 15) распознаются с невысоким качеством в связи с процессом возобновления в древостое ели, участие которой варьирует в сообществах и различной долей бореальных и неморальных видов в травяно-кустарничковом ярусе. Сосновые разнотравные леса (гр. 17) характеризуются низким уровнем распознавания из-за разнообразия экологических условий и участия представителей различных эколого-ценологических групп на фоне преобладания светолюбивых видов. В целом наблюдается следующая закономерность — при отнесении значительной доли сообществ к иному классу сообществ, классификатор определяет их в группу той же формации или того же состава растительности наземных ярусов. Общая точность классификации полевых описаний по резуль-

**Таблица 2.** Легенда к карте лесов Московского региона и относительное качество дискриминантного анализа (ДА), %

	Класс легенды	ДА, %
1	<b>Хвойные и хвойно-мелколиственные леса</b> Е л о в ы е ( <i>Picea abies</i> ) 1. Еловые с березой ( <i>Betula pendula</i> , <i>B. pubescens</i> ), осинкой ( <i>Populus tremula</i> ) и сосной ( <i>Pinus sylvestris</i> ) кустарничковые мелко травно-зеленомошные ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Luzula pilosa</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i> ) 2. **) Еловые с березой и осинкой мелко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> ) 3. **) Еловые с березой, осинкой и сосной лещиновые ( <i>Corylus avellana</i> ) мелко травно-широко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> ) 4. **) Еловые с березой, осинкой, сосной, дубом и липой ( <i>Quercus robur</i> , <i>Tilia cordata</i> ) широко травные ( <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Anemonoides nemorosa</i> , <i>Oxalis acetosella</i> )	62.2 57.5 58.5 70.9
2	<b>Елово-березово-осиновые</b> 5. **) Елово-березово-осиновые кустарничковые мелко травно-зеленомошные ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Orthilia secunda</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i> ) 6. **) Елово-березовые и елово-осиновые мелко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Dryopteris carthusiana</i> , <i>Rubus saxatilis</i> , <i>Plagiomnium affine</i> ) 7. **) Елово-березовые и елово-осиновые лещиновые мелко травно-широко травные ( <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Dryopteris carthusiana</i> , <i>D. filix-mas</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Rubus saxatilis</i> , <i>Ajuga reptans</i> , <i>Convallaria majalis</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Atrichum undulatum</i> , <i>Hylocomium splendens</i> ) 8. **) Елово-березовые с дубом, липой и кленом ( <i>Acer platanoides</i> ) лещиновые широко травные ( <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Dryopteris filix-mas</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Eurhynchium angustirete</i> )	50.0 36.4 46.9 52.0
3	<b>Сосново-еловые</b> 9. **) Сосново-еловые с березой кустарничковые мелко травно-зеленомошные ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Dryopteris carthusiana</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Hylocomium splendens</i> ) 10. **) Сосново-еловые мелко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> ) 11. **) Сосново-еловые лещиновые мелко травно-широко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Dryopteris carthusiana</i> ) 12. **) Сосново-еловые с березой, лещиной и жимолостью ( <i>Lonicera xylosteum</i> ) широко травные ( <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Oxalis acetosella</i> )	37.5 62.5 43.2 57.1
4	<b>Сосновые</b> 13. **) Сосновые с елью и березой кустарничковые мелко травно-зеленомошные ( <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. vitis-idaea</i> , <i>Pteridium aquilinum</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Convallaria majalis</i> , <i>Luzula pilosa</i> , <i>Maianthemum bifolium</i> , <i>Hylocomium splendens</i> , <i>Pleurozium schreberi</i> , <i>Dicranum scoparium</i> ) 14. **) Сосновые с елью и березой лещиновые мелко травные и кустарничково-мелко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> ) 15. **) Сосновые с елью и березой, местами с липой и дубом мелко травно-широко травные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Gymnocarpium dryopteris</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Dryopteris carthusiana</i> , <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> ) 16. **) Сосновые с елью, березой, дубом, липой и кленом лещиновые широко травные ( <i>Carex pilosa</i> , <i>Convallaria majalis</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Ranunculus cassubicus</i> , <i>Oxalis acetosella</i> ) 17. **) Сосновые с елью и березой разнотравные ( <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Poa angustifolia</i> , <i>Convallaria majalis</i> , <i>Fragaria vesca</i> ) 18. Сосновые с березой ( <i>Betula pubescens</i> ) кустарничковые травяно-сфагновые ( <i>Chamaedaphne calyculata</i> , <i>Ledum palustre</i> , <i>Vaccinium myrtillus</i> , <i>V. uliginosum</i> , <i>Oxycoccus palustris</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Sphagnum angustifolium</i> , <i>S. magellanicum</i> )	52.2 47.8 25.7 71.9 20.0 66.7
5	<b>Широколиственные и широколиственно-еловые леса</b> Д у б о в ы е 19. Дубовые с липой, елью и березой лещиновые широко травные ( <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> )	86.0
6	<b>Липовые</b> 20. *) Липовые широко травные ( <i>Carex pilosa</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Mercurialis perennis</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> )	82.1
7	<b>Дубово-липово-еловые</b> 21. *) Дубово-липово-еловые лещиновые широко травные ( <i>Carex pilosa</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Asarum europaeum</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Ranunculus cassubicus</i> , <i>Stellaria nemorum</i> )	55.3

Таблица 2. Окончание

	Класс легенды	ДА, %
8	<b>Мелколиственные леса</b> Березовые	42.9
	22. **) Березовые с елью и осинной мелкоотравные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Pyrola rotundifolia</i> , <i>Luzula pilosa</i> )	
	23. **) Березовые с елью и осинной мелкоотравно-широкоотравные ( <i>Oxalis acetosella</i> , <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Rubus saxatilis</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Pyrola rotundifolia</i> , <i>Cirriphyllum piliferum</i> )	51.7
	24. **) Березовые с елью, ольхой серой ( <i>Alnus incana</i> ) местами с дубом и липой лещиновые широкоотравные ( <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Stellaria nemorum</i> )	63.6
	25. **) Березняки с осинной, ольхой серой, ивой козьей ( <i>Salix caprea</i> ), елью влажнотравно-широкоотравные ( <i>Filipendula ulmaria</i> , <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>Impatiens noli-tangere</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Geum rivale</i> , <i>Atrichum undulatum</i> )	41.2
	26. Березовые с елью и осинной травяно-болотные ( <i>Filipendula ulmaria</i> , <i>Calamagrostis canescens</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Carex acuta</i> , <i>C. elongata</i> , <i>C. vesicaria</i> , <i>Scirpus sylvaticus</i> , <i>Aulacomnium palustre</i> , <i>Climacium dendroides</i> )	61.1
	27. **) Березовые с елью, осинной и ивой козьей разнотравные ( <i>Bromopsis inermis</i> , <i>Calamagrostis arundinacea</i> , <i>C. epigeios</i> , <i>Fragaria vesca</i> , <i>Lysimachia nummularia</i> , <i>Veronica chamaedrys</i> , <i>Deschampsia cespitosa</i> )	73.1
	28. **) Березовые с елью кустарничковые травяно-сфагновые ( <i>Chamaedaphne calyculata</i> , <i>Vaccinium uliginosum</i> , <i>Eriophorum vaginatum</i> , <i>Carex lasiocarpa</i> , виды р. <i>Sphagnum</i> , <i>Polytrichum commune</i> )	70.0
9	<b>Осиновые</b>	80.0
	29. **) Осиновые с березой, елью, дубом и липой лещиновые широкоотравные ( <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Galeobdolon luteum</i> , <i>Carex pilosa</i> , <i>Mercurialis perennis</i> )	
	30. **) Осиновые с березой, елью, дубом и черемухой ( <i>Padus avium</i> ) влажнотравно-широкоотравные ( <i>Athyrium filix-femina</i> , <i>Crepis paludosa</i> , <i>Filipendula ulmaria</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Pulmonaria obscura</i> , <i>Equisetum pratense</i> , <i>Stellaria nemorum</i> , <i>Impatiens noli-tangere</i> , <i>Atrichum undulatum</i> , <i>Plagiomnium cuspidatum</i> )	62.5
10	<b>Сероольховые</b>	96.4
	31. *) Сероольховые ( <i>Alnus incana</i> ) влажнотравно-широкоотравные ( <i>Urtica dioica</i> , <i>Campanula latifolia</i> , <i>Filipendula ulmaria</i> , <i>Rubus idaeus</i> , <i>Aegopodium podagraria</i> , <i>Chrysosplenium alternifolium</i> , <i>Myosoton aquaticum</i> , <i>Stellaria nemorum</i> , <i>Plagiomnium undulatum</i> )	
11	<b>Черноольховые</b>	87.0
	32. Черноольховые ( <i>Alnus glutinosa</i> ) влажнотравно-широкоотравные ( <i>Impatiens noli-tangere</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Milium effusum</i> , <i>Paris quadrifolia</i> , <i>Ranunculus cassubicus</i> )	
	33. *) Черноольховые травяно-болотные ( <i>Urtica dioica</i> , <i>Filipendula ulmaria</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Carex appropinquata</i> , <i>C. vesicaria</i> , <i>Calla palustris</i> , <i>Humulus lupulus</i> )	67.7

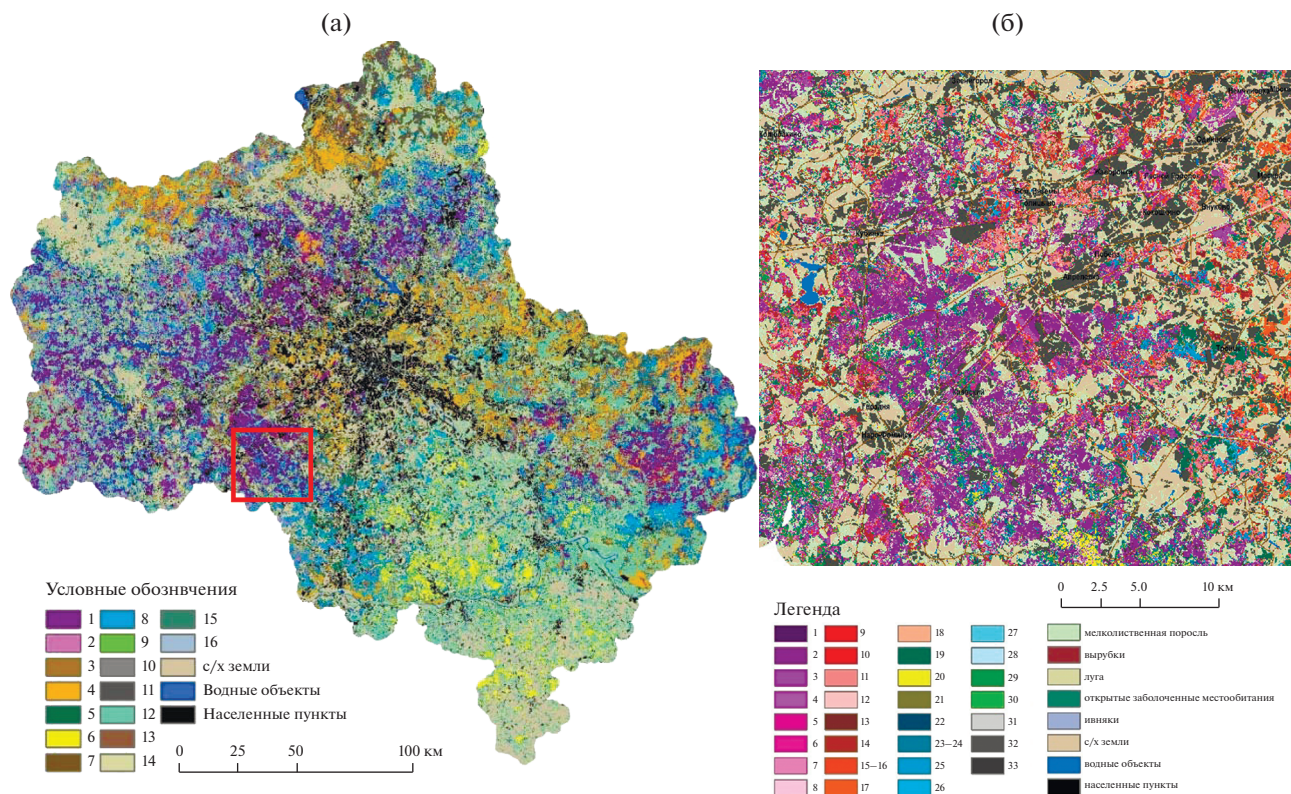
татам линейного пошагового дискриминантного составила 62.1%. В этой связи близкие по составу соседние группы (гр. 14–15, 22–23), характеризующиеся низким качеством дискриминации и небольшим числом описаний, были объединены. В результате точность модели повышена без существенной утраты информативности карты. В итоге в составе легенды фигурирует 31 группа лесных ассоциаций.

Высшие подразделения легенды – типы растительности (болотная, лесная, луговая, кустарничковая) (табл. 2). Лесная растительность подразделена на классы формаций (хвойные, хвойно-мелколиственные, широколиственные, широколиственно-хвойные и мелколиственные леса). В пределах классов формаций по общности лесообразующей породы деревьев на уровне рода вы-

делены формации (еловые, сосновые, березовые и прочие леса). Основной картографируемой единицей является группа ассоциаций, которая выделена по составу основных доминантов древесного яруса и преобладающим эколого-морфологическим группам наземного покрова. Наименования групп ассоциаций дополнены перечнем основных характерных видов. В легенде нашло отражение сукцессионное состояние лесов. Знаком “\*\*\*” обозначены производные сообщества; знаком “\*” – сообщества разного генезиса, являющиеся в одних случаях коренными, в других – производными вследствие хозяйственного преобразования условий местообитаний.

В целом в легенде выделено 39 категорий. Из лесных категорий представлены следующие: 32 – мелколиственная поросль, 33 – вырубки, 34 – лу-





**Рис. 1.** Картографическая модель разнообразия лесов Московского региона: а – формации, б – фрагмент карты лесов (группы ассоциаций). Обозначение выделенных тематических классов лесной растительности дано в табл. 2.

га, 35 – открытые заболоченные местообитания, 36 – ивняки, 37 – сельхозугодья, 38 – водные объекты, 39 – населенные пункты.

### Результаты моделирования

Моделирование пространственного распределения классов лесного покрова проведено для двух категорий: для формаций и групп ассоциаций (рис. 1). Лесные формации, как более крупные и агрегированные синтаксоны, подтверждаются статистически достаточными и однородными обучающими выборками. Это делает данные лесные образования более надежными для пространственного моделирования. Пространственные единицы в ранге группы ассоциаций более разнородны, они имеют неоднородные обучающие выборки и, следовательно, являются при моделировании более чувствительными к разного рода погрешностям естественными объектами.

Моделирование отдельно по формациям и по группам ассоциаций выполняет функцию оценки неопределенности моделей. Отклонения долей лесной площади, полученных по двум различным моделям для типологических единиц на разных пространственных уровнях, незначительны, варьируют по модулям от 0.1 до 7.6% (березовая

формация) и составляют в среднем 2.19%. Это является аргументом в пользу того, что аналогичные типологические единицы корректны и устойчиво дешифрируются в рамках обеих моделей сходным набором спектральных яркостей.

Общая сходимость для пространственных единиц в ранге групп ассоциаций составила 59%. Наименьшая сходимость наблюдается для еловых и елово-мелколиственных сообществ: гр. 7 – 13%; гр. 4 – 18%; гр. 8 – 21%; гр. 3 – 23%; гр. 5 – 30%, а также в сероольховой гр. 31 – 36%. Наибольшая неопределенность наблюдалась при отделении друг от друга еловых, елово-мелколиственных мелкотравных, мелкотравно-широкоотравных групп ассоциаций, березовых и осиновых широкоотравных и влажноотравно-широкоотравных групп ассоциаций. В модели формаций при общей схожести 67% наименьшая доля правильно определенных типов наблюдалась у елово-мелколиственных и сероольховых формаций. Елово-мелколиственная чаще всего плохо отделялась от еловой, а сероольховая – от еловой, сосново-еловой и сосновой формаций.

Факторы указанных расхождений частично обсуждались ранее (Kotlov, Chernenkova, 2020; Chernenkova et al., 2020) и заключаются в следующем: в ошибках GPS-позиционирования точек,



неоднородности спектральных яркостей в силу воздействия атмосферных искажений, недостатке точек полевых описаний и сходных спектральных свойств разных типов сообществ. По мнению авторов, вклад первых трех факторов удалось минимизировать благодаря отрисовке контуров. Однако спектральная близость различных сообществ ранга формаций и особенно групп ассоциаций, скорее всего, не позволит на региональном уровне отделять леса с точностью выше 80%, сходные как по составу древесного, так и травяно-кустарничкового яруса. Особенности верификации выделенных групп от спутниковых данных и показателей рельефа в целом соответствуют закономерностям варьирования точности классификации полевых описаний и объясняются свойствами естественной континуальности состава лесного покрова исследуемого региона.

Можно отметить, что, по сравнению с аналогичными исследованиями в Норвегии (7710 точек) и Эстонии (более 102 тысяч точек), число наших полевых описаний невелико (менее 2000 точек) с учетом 30% отобранных для верификации в качестве тестовой выборки. Однако при таком существенном дефиците полевых данных удалось достичь приемлемого уровня сходности (0.59 – по группам ассоциаций, 0.67 – по формациям). Данный уровень точности модели сравним с результатами упомянутых исследований: 0.6 – для оценки запасов древостоя в Норвегии (Puliti et al., 2020), 0.75 – для оценки одной из семи преобладающих пород в Эстонии (Lang et al., 2018). При этом очевидно, что в представленном исследовании решалась более сложная задача – моделирование тематических классов, учитывающих не только сложный полидоминантный состав древесного яруса, но и состав травяно-кустарничкового и мохового ярусов, отражающих особенности биотопов, а также характерное сукцессионное состояние лесных сообществ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг и количественная оценка разнообразия лесного покрова важны для поддержания устойчивого развития природной среды. Данное исследование демонстрирует результаты моделирования ценотического разнообразия лесов на примере Московского региона. Применение количественных методов анализа наземной и дистанционной информации позволило с оптимальной на сегодняшний день детальностью отразить современное состояние и в определенной мере причины неоднородности лесного покрова. Использованный в работе метод дал возможность значительно расширить существующую практику инвентаризации лесных насаждений и впервые создать картографическую цифровую модель лесного покрова Московского региона на детальном

типологическом уровне. Разработанные карты лесов в ранге формации и групп ассоциаций отражают современное типологическое разнообразие региона. Предлагаемый алгоритм пространственного моделирования отличается простотой и воспроизводимостью, опирается на открытые ДДЗ и полевые данные. Статистические методы и цифровой формат картографических материалов определяют адаптивность подхода и необходимую актуализацию материалов.

Пополнение данных наземных исследований, безусловно, увеличит общую долю правильно определенных типов сообществ и в целом точность картографической модели. При этом следует учитывать, что любая модель всегда будет носить условный характер, отражая в разной мере фундаментальные свойства растительного покрова – его континуальность и дискретность.

*Благодарности.* Авторы благодарны М.В. Архиповой, Н.Г. Кадетову, С.Ю. Попову и многим другим коллегам, принимавшим участие в сборе геоботанических описаний, Е.А. Игнатовой – за помощь в определении мохообразных видов. Мы также признательны авторам монографии “Химкинская дубрава: опыт комплексного обследования” (2015) за размещенные там геоботанические описания широколиственных лесов, которые использованы нами в общем анализе данных.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Космические исследования лесов // Земля и Вселенная. 2020. № 6. С. 5–17.
- Васильев О.Д., Огуреева Г.Н., Чистов С.В.* Оценка ценотического разнообразия лесного покрова и его динамики в эталонных ландшафтах Московского региона по данным дистанционного зондирования // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. Т. 64. № 2. С. 185–205.
- Волкова Е.А., Храпцов В.Н.* Опыт оценки динамического состояния растительности на основе крупномасштабной карты современного растительного покрова (на примере территории “Левашовский лес”, Санкт-Петербург) // Геоботаническое картографирование. 2019. № 2019. С. 39–56.
- Груммо Д.Г., Зеленкевич Н.А., Цвирко Р.В.* Инвентаризация и оценка современного состояния биологического разнообразия национального парка “Беловежская пуша” с помощью дистанционных и геоинформационных методов // Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития: Материалы междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 85-летию фак. географии и геоинформатики Белорус. гос. ун-та и 65-летию Белорус. геогр. о-ва, Минск, 13–15 нояб. 2019 г. Минск: БГУ, 2019. С. 353–356.
- Ермаков Н.Б.* Продромус высших единиц растительности России // Современное состояние основных концепций науки о растительности. Уфа: АН РБ, Гилем, 2012. С. 377–483.

- Ершов Д.В., Гаврилюк Е.А., Карпухина Д.А., Ковганко К.А.* Новая карта растительности центральной части Европейской России по спутниковым данным высокой детальности. Доклады Академии наук, 2015. Т. 464. № 5. С. 639–641.
- Игнатов М.С., Игнатова Е.А.* Флора мхов средней части Европейской России. М.: КМК. 2003. Т. 1–2. 960 с.
- Карта “Растительность Московской области” м. 1 : 200 000 / Под ред. Огуреевой Г.Н. 1996. М.: “Экор Москва”.
- Лесной план Московской области. Правительство Московской области. Комитет лесного хозяйства Московской области. Книга 1. Красногорск, 2018. 83 с.
- Маслов А.А., Полякова Г.А., Меланхолин П.Н., Стороженко В.Г., Рубцов В.В., Уткина И.А., Гульбе Я.И., Орлов М.С., Сирин А.А.* Химкинская дубрава: опыт комплексного обследования. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 178 с.
- Мелкий В.А., Верхотуров А.А., Сабиров Р.Н., Братков В.В.* Анализ состояния лесных земель на острове Сахалин // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: Науки о Земле, 2019. № 2 (14). С. 68–73.
- Мониторинг биологического разнообразия лесов России. Методология и методы / Под ред. А.С. Исаева. М.: Наука, 2008. 453 с.
- Морозова О.В., Беляева Н.Г., Гнеденко А.Е., Сулова Е.Г., Черненко Т.В.* Синтаксономия и экология черноольшаников Московской области // Растительность России. 2021. № 42. С. 42–62.
- Нешатаев В.Ю.* Проект Всероссийского кодекса фитоценологической номенклатуры // Растительность России. 2001. № 1. С. 62–70.
- Нешатаев М.В., Нешатаев В.Ю.* Комбинированный метод картографирования растительности (на примере Лапландского заповедника) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2012. № 201. С. 29–40.
- Плугатарь Ю.В., Ермаков Н.Б., Крестов П.В., Матвеева Н.В., Мартыненко В.Б., Голуб В.Б., Нешатаева В.Ю., Нешатаев В.Ю., Аненхонов О.А., Лавриненко И.А., Лавриненко О.В., Чепинога В.В., Синельникова Н.В., Морозова О.В., Белоновская Е.А., Тишков А.А., Черненко Т.В., Кривококов Л.В., Телятников М.Ю., Лапина Е.Д., Онипченко В.Г., Королева Н.Е., Черосов М.М., Семениченков Ю.А., Абрамова Л.М., Лысенко Т.М., Полякова М. А.* Концепция классификации растительности России как отражение современных задач фитоценологии // Растительность России. 2020. № 38. С. 3–12.
- Разумовская А.В.* Подходы к составлению обобщенной крупномасштабной карты растительности территории Кенозерского национального парка // Геоботаническое картографирование 2018. С. 40–65.
- Рыжкова В.А., Данилова И.В., Корец М.А.* Классификация и пространственное моделирование лесного покрова на основе ГИС (принципы и методика) // ИнтерКарто/ИнтерГИС 21: Материалы междунар. конф. Устойчивое развитие территорий: теория ГИС и практический опыт. Краснодар, Сочи, Сува (Фиджи), 12–19 ноября 2015 г. Краснодар. С. 82–89.
- Рысин Л.П., Савельева Л.И.* Эталонные леса, их значение и критерии выбора // Ботанический журнал. 1980. Т. 65. № 1. С. 133–140.
- Семениченков Ю.А., Корсииков Р.С.* Сравнительный анализ двух подходов к крупномасштабному картографированию лесной растительности в Южном Нечерноземье России // Геоботаническое картографирование. 2020. С. 3–23.
- Сирин А.А., Маслов А.А., Валяева Н.А., Цыганова О.П., Глухова Т.В.* Картографирование торфяных болот Московской области по данным космической съемки высокого разрешения // Лесоведение. 2014. № 5. С. 65–71.
- Смирнов В.Э., Ханина Л.Г., Бобровский М.В.* Обоснование системы эколого-ценотических групп видов растений лесной зоны Европейской России на основе экологических шкал, геоботанических описаний и статистического анализа // Бюллетень МОИП. Сер. Биологическая. 2006. Т. 111. № 2. С. 36–47.
- Черепанов С.К.* Сосудистые растения России и сопредельных государств. СПб.: Мир и семья, 1995. 992 с.
- Черненко Т.В., Пузаченко М.Ю., Беляева Н.Г., Котлов И.П., Морозова О.В.* Характеристика и перспективы сохранения сосновых лесов Московской области // Лесоведение. 2019. № 5. С. 449–464.
- Черненко Т.В., Морозова О.В.* Классификация и картографирование ценотического разнообразия лесов // Лесоведение. 2017. № 4. С. 243–255.
- Черненко Т.В., Сулова Е.Г., Морозова О.В.* и др. Биоразнообразие лесов Московского региона // Экосистемы: экология и динамика. 2020. Т. 4, № 3. С. 61–144.
- Abad-Segura E., Battles de la Fuente A., González-Zamar M.-D., Belmonte-Ureña L.Je.* Effects of Circular Economy Policies on the Environment and Sustainable Growth: Worldwide Research // Sustainability. 2020. Т. 12. № 14. P. 5792.
- Abdullah H., Skidmore A., Darvishzadeh R., Heurich M.* Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8 // Remote sensing in ecology and conservation. 2019. Т. 5. № 1. P. 87–106.
- Baines O., Wilkes P., Disney M.* Quantifying urban forest structure with open-access remote sensing data sets // Urban Forestry & Urban Greening. 2020. V. 50. № 126653.
- Chernenkova T., Kotlov I., Belyaeva N., Suslova E., Morozova O., Pesterova O., Arkhipova M.* Role of Silviculture in the Formation of Norway Spruce Forests along the Southern Edge of Their Range in the Central Russian Plain // Forests. 2020. V. 11. P. 778. [Электронный ресурс <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/7/778/pdf> (дата обращения 14.03.2022)].
- Ghilarov A.M.* Ecosystem functioning and intrinsic value of biodiversity // Oikos. 2000. V. 90. № 2. P. 408–412.
- Gillespie T., Foody G. M., Rocchini D., Giorgi A. P., Saatchi S.* Measuring and modeling biodiversity from space // Progress in Physical Geography. 2008. V. 32. P. 203–221.
- Gislason P.O., Benediktsson J.A., Sveinsson J.R.* Random forest classification of multisource remote sensing and geographic data. IEEE, 2004. P. 1049–1052.
- Gobron N., Pinty B., Verstraete M., Widlowski J.* Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: De-

- sign, performance, and applications // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2000. V. 38. № 6. P. 2489–2505.
- Grabska E., Frantz D., Ostapowicz K. Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 251. P. 112103.
- Haase D., Jänicke C., Wellmann T. Front and back yard green analysis with subpixel vegetation fractions from earth observation data in a city // *Landscape and Urban Planning*. 2019. V. 182. P. 44–54.
- Haklay M., Weber P. Openstreetmap: User-generated street maps // *IEEE Pervasive Computing*. 2008. V. 7. № 4. P. 12–18.
- Hancock D.W., Dougherty C.T. Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa // *Crop Science*. 2007. V. 47. № 6. P. 2547–2556.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. 2013. V. 342. № 6160. P. 850–853.
- Inglada J., Christophe E. The Orfeo Toolbox remote sensing image processing software // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2009. P. IV-733–IV-736.
- Jiang B., Brian D., HaoZhi P., Linda L. et al. Remotely-sensed imagery vs. eye-level photography: Evaluating associations among measurements of tree cover density // *Landscape and Urban Planning*. 2017. V. 157. P. 270–281.
- Joelsson S.R., Benediktsson J.A., Sveinsson J.R. Random forest classification of remote sensing data // *Signal and Image Processing for Remote Sensing*. 2006. Vol. 978. P. 344–361.
- Kotlov I.P., Chernenkova T.V. Modeling of forest communities spatial structure at the regional level through remote sensing and field sampling: constraints and solutions // *Forests*. 2020. V. 11. № 10. P. 1088.
- Lang M., Kaha M., Laarmann D., Sims A. Construction of tree species composition map of Estonia using multispectral satellite images, soil map and a random forest algorithm // *Forestry Studies*. 2018. V. 68. № 1. P. 5–24.
- Lisovsky A., Dudov S., Obolenskaya E. Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 1. A general approach // *Biology Bulletin Reviews*. 2020. T. 81. № 2. P. 123–134.
- Lurie I.K., Baldina E.A., Prasolova A.I., Prokhorova E.A., Semin V.N., Chistov S.V. A series of maps of the environmental-geographical assessment of land resources of the New Moscow territory // *Vestnik Moskovskogo universiteta*. 2015. P. 50–59.
- Lutz W., Sanderson W., Scherbov S. The end of world population growth // *Nature*. 2001. V. 412. № 6846. P. 543–545.
- Lyons M.B., Keith D.A., Phinn S. et al. A comparison of resampling methods for remote sensing classification and accuracy assessment // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 208. P. 145–153.
- Mucina L., Grabherr G., Wallnöfer S., Geisselbercht L., Grass V., Gutermann W., Justin Ch., Wirth J.M. Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil III. Wälder und Gebüsche. Jena, 1993. 356 p.
- Nefedova T.G., Mkrtychan N.V. Migration of rural population and dynamics of agricultural employment in the regions of Russia // *Vestnik Moskovskogo universiteta*. 2017. P. 58–67.
- Neshataeva V.Y., Pesterov A., Golubev S. Boreal Vegetation of the Kamchatka Peninsula and Adjacent Areas and its Geobotanical Mapping // *Global Research Initiative in Alpine Environments (GLORIA)*. 2012. P. 35.
- Puliti S., Hauglin M., Breidenbach J. et al. Modelling above-ground biomass stock over Norway using national forest inventory data with ArcticDEM and Sentinel-2 data // *Remote Sensing of Environment*. 2020. V. 236. № 111501.
- Puzachenko Yu.G., Sandlerskiy R., Krenke A., Puzachenko M.Yu. Multispectral remote information in forest research // *Contemporary Problems of Ecology*. 2014. V. 7. № 7. P. 838–854.
- Reyers B., Polasky S., Tallis H. et al. Finding Common Ground for Biodiversity and Ecosystem Services // *BioScience*. 2012. V. 62. № 5. P. 503–507.
- Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Tomohiro S., Thapa R., Lucas R. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010) // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 155. P. 13–31.
- Vergel K., Zinicovskaia I., Yushin N., Frontasyeva M.V. Heavy Metal Atmospheric Deposition Study in Moscow Region, Russia // *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 2019. V. 103. P. 435–440.
- Wang K., Wang T., Liu X. A Review: Individual Tree Species Classification Using Integrated Airborne LiDAR and Optical Imagery with a Focus on the Urban Environment // *Forests*. 2019. V. 10. № 1.

## Assessment and Mapping of the Cenotic Diversity of the Moscow Region's Forests

T. V. Chernenkova<sup>1</sup>\*, I. P. Kotlov<sup>2</sup>, N. G. Belyaeva<sup>1</sup>, Ye. G. Suslova<sup>3</sup>, and O. V. Morozova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geography of the RAS, Staromonetnyy ln. 29, Moscow, 119017 Russia*

<sup>2</sup>*Severtsov Institute of Ecology and Evolution of the RAS, Leninsky ave. 33, Moscow, 119071 Russia*

<sup>3</sup>*Moscow State University, Leninskie Gory 1, Moscow 119991 Russia*

\*E-mail: chernenkova50@mail.ru

The growing population density of large metropolitan areas means an increase in ecological and social importance of the forest cover's biodiversity. The lack of up-to-date cartographic materials makes it difficult to assess the quality of the natural environment and to preserve valuable natural objects while taking into account the conditions of habitats and types of land use. The aim of this work was to identify and map the cenotic diversity of the Moscow region's forest cover. To study the spatial structure of communities, remote data

(Sentinel-2A, PALSAR radar images), digital relief models (DRM SRTM) in combination with ground survey data were used. To compensate for the scarce and uneven distribution of field data, the training sample alignment approach was used with the selection of the optimal modelling algorithm (“random forest”). Cartographic models have been developed for the modern phytocenotic diversity of the Moscow region’s forest cover, for thematic units of the formation (11 classes) and a group of associations (31 classes) ranks, accompanied by a detailed legend. Statistical methods and digital format of the cartographic materials determine the approach’s adaptability and the necessary updating of the materials. The proposed mapping technique and the performed assessment of the typological diversity of the forests can be used to create a spatial basis for monitoring the biodiversity of the forests in the Moscow region and the urban forests of Moscow.

*Keywords:* phytocenotic diversity, forest cover, mapping, Sentinel, DRM SRTM, random forest algorithm, Moscow region.

**Acknowledgements:** The work has been carried out within the framework of the IG RAS theme № 0148-2019-0007.

## REFERENCES

- Abad-Segura E., Batlles de la Fuente A., González-Zamar M.-D., Belmonte-Ureña L.Je., Effects of Circular Economy Policies on the Environment and Sustainable Growth: Worldwide Research, *Sustainability*, 2020, Vol. 12, No. 14, p. 5792.
- Abdullah H., Skidmore A., Darvishzadeh R., Heurich M., Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8, *Remote sensing in ecology and conservation*, 2019, Vol. 5, No. 1, pp. 87–106.
- Baines O., Wilkes P., Disney M., Quantifying urban forest structure with open-access remote sensing data sets, *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, Vol. 50, No. 126653.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Kosmicheskie issledovaniya lesov (Space exploration of forests), *Zemlya i Vselennaya*, 2020, No. 6, pp. 5–17.
- Cherepanov, S.K., *Sosudistye rasteniya Rossii i sopredel’nykh gosudarstv* (Vascular Plants of Russia and Adjacent Countries), St. Petersburg: Mir i Sem’ya, 1995. 992 p.
- Chernenkova T., Kotlov I., Belyaeva N., Suslova E., Morozova O., Pesterova O., Arkhipova M. Role of Silviculture in the Formation of Norway Spruce Forests along the Southern Edge of Their Range in the Central Russian Plain, *Forests*, 2020, Vol. 11, p. 778, available at: <https://www.mdpi.com/1999-4907/11/7/778/pdf> (March 14, 2022).
- Chernen’kova T.V., Morozova O.V., Classification and mapping of coenotic diversity of forests, *Contemporary problems of ecology*, 2017, Vol. 10, No. 7, pp. 738–747.
- Chernen’kova T.V., Puzachenko M.Y., Belyaeva N.G., Morozova O.V., Kotlov I.P., Pine forests in Moscow region: history and perspectives of preservation, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, No. 7, pp. 711–723.
- Chernen’kova T.V., Suslova E.G., Morozova O.V., et al., Bioraznoobrazie lesov Moskovskogo regiona (Forest biodiversity of Moscow region), *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2020, Vol. 4, No. 3, pp. 61–144.
- Ermakov N.B., Prodrumus vysshikh edinits rastitel’nosti Rossii (Prodrumus of higher units of vegetation in Russia), In: *Sovremennoe sostoyanie osnovnykh kontseptsii nauki o rastitel’nosti* (The current state of the fundamental concepts of the science of vegetation), Ufa: Gilem, 2012, pp. 377–483.
- Ershov D.V., Gavrilyuk E.A., Karpukhina D.A., Kovgan’ko K.A., A new map of the vegetation of central European Russia based on high-resolution satellite data, *Doklady Biological Sciences*, 2015, Vol. 464, No. 1, pp. 251–253.
- Ghilarov A.M., Ecosystem functioning and intrinsic value of biodiversity, *Oikos*, 2000, Vol. 90, No. 2, pp. 408–412.
- Gillespie T., Foody G.M., Rocchini D., Giorgi A.P., Saatchi S., Measuring and modeling biodiversity from space, *Progress in Physical Geography*, 2008, Vol. 32, pp. 203–221.
- Gislason P.O., Benediktsson J.A., Sveinsson J.R., Random forest classification of multisource remote sensing and geographic data, *IEEE*, 2004, pp. 1049–1052.
- Gobron N., Pinty B, Verstraete M, Widlowski J., Advanced vegetation indices optimized for up-coming sensors: Design, performance, and applications, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, Vol. 38, No. 6, pp. 2489–2505.
- Grabska E., Frantz D., Ostapowicz K., Evaluation of machine learning algorithms for forest stand species mapping using Sentinel-2 imagery and environmental data in the Polish Carpathians, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 251, p. 112103.
- Grummo D.G., Zelenkevich N.A., Tsvirko R.V., Inventarizatsii i otsenka sovremennogo sostoyaniya biologicheskogo raznoobraziya natsional’nogo parka “Belovezhskaya pushcha” s pomoshch’yu distantsionnykh i geoinformatsionnykh metodov (Inventory and evaluation of the modern condition of the biological diversity of the National Park “Belovezhskaya pushcha” using remote and geoinformational methods), *Sovremennye napravleniya razvitiya fizicheskoi geografii: nauchnye i obrazovatel’nye aspekty v tselyakh ustoychivogo razvitiya* (Modern trends in the development of physical geography: scientific and educational aspects for sustainable development), Minsk, Proc. of the international. scientific-practical. conf., dedicated 85th anniversary of the Faculty of Geography and Geoinformatics of the Belarusian State University and the 65th anniversary of the Belarusian Geographical Society, November 13–15, 2019, Minsk: BGU, pp. 353–356.
- Ignatov M.S., Ignatova E.A., Flora mkhov srednei chasti evropeiskoi Rossii (Moss flora of the Middle European Russia), Moscow: KMK, 2003, Vol. 1–2, 960 p.
- Haase D., Jänicke C., Wellmann T., Front and back yard green analysis with subpixel vegetation fractions from earth observation data in a city, *Landscape and Urban Planning*, 2019, Vol. 182, pp. 44–54.
- Haklay M., Weber P., Openstreetmap: User-generated street maps, *IEEE Pervasive Computing*, 2008, Vol. 7, No. 4, pp. 12–18.

- Hancock D.W., Dougherty C.T., Relationships between blue- and red-based vegetation indices and leaf area and yield of alfalfa, *Crop Science*, 2007, Vol. 47, No. 6, pp. 2547–2556.
- Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A. et al., High-resolution global maps of 21st-century forest cover change, *Science*, 2013, Vol. 342, No. 6160, pp. 850–853.
- Inglada J., Christophe E., The Orfeo Toolbox remote sensing image processing software, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009, pp. IV-733- IV-736.
- Jiang B., Brian D., HaoZhi P., Linda L. et al., Remotely-sensed imagery vs. eye-level photography: Evaluating associations among measurements of tree cover density, *Landscape and Urban Planning*, 2017, Vol. 157, pp. 270–281.
- Joelsson S.R., Benediktsson J.A., Sveinsson J.R., Random forest classification of remote sensing data, *Signal and Image Processing for Remote Sensing*, 2006, Vol. 978, pp. 344–361.
- Kotlov I.P., Chernenkova T.V., Modeling of forest communities spatial structure at the regional level through remote sensing and field sampling: constraints and solutions, *Forsts*, 2020, Vol. 11, No. 10, p. 1088.
- Lang M., Kaha M., Laarmann D., Sims A., Construction of tree species composition map of Estonia using multispectral satellite images, soil map and a random forest algorithm, *Forestry Studies*, 2018, Vol. 68, No. 1, pp. 5–24.
- Lesnoi plan Moskovskoi oblasti*, (Forest plan of the Moscow region), Moscow: Federal'noe agentstvo lesnogo khozyaistva, Federal'noe gosudarstvennoe byudzhethoe uchrezhdenie "Roslesinforg", Filial FGBU "Roslesinforg" "Moslesproekt", 2018, Vol. 1, 83 p.
- Lisovsky A., Dudov S., Obolenskaya E., Advantages and limitations of application of the species distribution modeling methods. 1. A general approach, *Biology Bulletin Reviews*, 2020, Vol. 81, No. 2, pp. 123–134.
- Lurie I.K., Baldina E.A., Prasolova A.I., Prokhorova E.A., Semin V.N., Chistov S.V., A series of maps of the environmental-geographical assessment of land resources of the New Moscow territory, *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2015, pp. 50–59.
- Lutz W., Sanderson W., Scherbov S., The end of world population growth, *Nature*, 2001, Vol. 412, No. 6846, pp. 543–545.
- Lyons M.B. Keith D. A, Phinn S. et al., A comparison of re-sampling methods for remote sensing classification and accuracy assessment, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 208, pp. 145–153.
- Maslov A.A., *Khiminskaya dubrava: opyt kompleksnogo ob sledovaniya* (Oak forest of Khimki: a case of complex study), Moscow: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2015, 178 p.
- Melkii V.A., Verkhoturov A.A., Sabirov R.N., Bratkov V.V., Analiz sostoyaniya lesnykh zemel' na ostrove Sakhalin (Analysis of state forest lands on the island of Sakhalin), *Vestnik Severo-Vostochnogo federal'nogo universiteta im. M.K. Ammosova. Seriya: Nauki o Zemle*, 2019, No. 2 (14), pp. 68–73.
- Monitoring biologicheskogo raznoobraziya lesov Rossii: metodologiya i metody* (Monitoring of the biological diversity of the forests of Russia: methodology and approaches), Moscow: Nauka, 2008, 453 p.
- Morozova O.V., Belyaeva N.G., Gnedenko A.E., Suslova E.G., Chernen'kova T.V., Sintaksonomiya i ekologiya chernool'shanikov Moskovskoi oblasti (Syntaxonomy and ecology of the Moscow region black alder communities), *Rastitel'nost' Rossii*, 2021, No. 42, pp. 42–62.
- Mucina L., Grabherr G., Wallnöfer S., Geisselbercht L., Grass V., Gutermann W., Justin Ch., Wirth J.M., *Die Pflanzengesellschaften Österreichs. Teil III. Jena: Wälder und Gebüsche*, 1993, 356 p.
- Nefedova T.G., Mkrtchan N.V., Migration of rural population and dynamics of agricultural employment in the regions of Russia, *Vestnik Moskovskogo universiteta*, 2017, pp. 58–67.
- Neshataev M.V., Neshataev V.Y., Kombinirovannyi metod kartografirovaniya rastitel'nosti (na primere Laplandskogo zapovednika) (Combined method of vegetation mapping (on the example of the Lapland Reserve)), *Izvestiya Sankt-Peterburgskoi lesotekhnicheskoi akademii*, 2012, No. 201, pp. 29–40.
- Neshataeva V.Y., Pesterov A., Golubev S., Boreal Vegetation of the Kamchatka Peninsula and Adjacent Areas and its Geobotanical Mapping, *Global Research Initiative in Alpine Environments (GLORIA)*, 2012, pp. 35.
- Neshatayev V.Y., Proekt Vserossiiskogo kodeksa fitotsenologicheskoi nomenklatury (The project of the All-Russian Code of phytosociological nomenclature), *Rastitel'nost' Rossii*, 2001, No. 1, pp. 62–70.
- Plugatar' Y.V., Ermakov N.B., Krestov P.V., Matveeva N.V., Martynenko V.B., Golub V.B., Neshataeva V.Y., Neshataev V.Y., Anenkhonov O.A., Lavrinenko I.A., Lavrinenko O.V., Chepinoga V.V., Sinel'nikova N.V., Morozova O.V., Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Chernen'kova T.V., Krivobokov L.V., Telyatnikov M.Y., Lapshina E.D., Onipchenko V.G., Koroleva N.E., Cherosov M.M., Semenishchenkov Y.A., Abramova L.M., Lysenko T.M., Polyakova M.A., Kontseptsiya klassifikatsii rastitel'nosti Rossii kak otrazhenie sovremennykh zadach fitotsenologii (The concept of vegetation classification of Russia as an image of contemporary tasks of phytocoenology), *Rastitel'nost' Rossii*, 2020, No. 38, pp. 3–12.
- Puliti S., Hauglin M., Breidenbach J. et al., Modelling above-ground biomass stock over Norway using national forest inventory data with ArcticDEM and Sentinel-2 data, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 236, No. 111501.
- Puzachenko Yu.G., Sandlerskiy R., Krenke A., Puzachenko M. Yu., Multispectral remote information in forest research, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 838–854.
- Rastitel'nost' Moskovskoi oblasti. Masshtab 1 : 200000* (Vegetation of Moscow Oblast. Scale 1 : 200000), Moscow: "Ekor Moskva", 1996.
- Razumovskaya A.V., Podkhody k sostavleniyu obobshchennoi krupnomasshtabnoi karty rastitel'nosti territorii Kenozerskogo natsional'nogo parka (Approaches to the generalized large-scale vegetation mapping of the Kenozersky National Park), *Geobotanicheskoe kartografirovanie*, 2018, pp. 40–65.
- Reyers B. Polasky S., Tallis H. et al., Finding Common Ground for Biodiversity and Ecosystem Services, *BioScience*, 2012, Vol. 62, No. 5, pp. 503–507.
- Rysin L.P., Savel'eva L.I., Etalonnnye lesa, ikh znachenie i kriterii vybora (Standart forests, their significance and cri-

- teria for selection), *Botanicheskii zhurnal*, 1980, Vol. 65, No. 1, pp. 133–140.
- Ryzhkova V.A., Danilova I.V., Korets M.A., Klassifikatsiya i prostranstvennoe modelirovanie lesnogo pokrova na osnove GIS (printsipy i metodika) (Forest cover classification and spatial modelling based on GIS (principles and technique)), *InterKarto/InterGIS 21*, Krasnodar, Sochi, Suva (Fidzhi), Proc. of Int. Conf., November 12–19, 2015, Krasnodar, 2015, pp. 82–89.
- Semenishchenkov Y.A., Korsikov R.S., Sravnitel'nyi analiz dvukh podkhodov k krupnomasshtabnomu kartografirovaniyu lesnoi rastitel'nosti v Yuzhnom Nechernozem'e Rossii (Comparative analysis of two approaches to large-scale mapping of forest vegetation in the southern Nechernozemye of Russia), *Geobotanicheskoe kartografirovanie*, 2020, pp. 3–23.
- Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Tomohiro S., Thapa R., Lucas R., New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010), *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 155, pp. 13–31.
- Sirin A., Maslov A., Valyaeva N., Tsyganova O., Glukhova T., Mapping of peatlands in the Moscow oblast based on high-resolution remote sensing data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 808–814.
- Smirnov V.E., Khanina L.G., Bobrovsky M.V., Obosnovanie sistemy ekologo-tsenoticheskikh grupp vidov rastenii lesnoi zony Evropeiskoi Rossii na osnove ekologicheskikh shkal, geobotanicheskikh opisaniy i statisticheskogo analiza (Validation of the ecological-coenotical groups of vascular plant species for European Russian forests on the basis of ecological indicator values, vegetation relevés and statistical analysis), *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel biologicheskii*, 2006, Vol. 111, No. 2, pp. 36–47.
- Vasil'ev O.D., Ogureeva G.N., Chistov S.V., Otsenka tsenoticheskogo raznoobraziya lesnogo pokrova i ego dinamiki v etalonnnykh landshaftakh Moskovskogo regiona po dan-nym distantsionnogo zondirovaniya (The assessment of forest coenotic diversity and its dynamics in Moscow region reference landscapes based on remote sensing data), *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*, 2019, Vol. 64, No. 2, pp. 185–205.
- Vergel K., Zinicovscaia I., Yushin N., Frontasyeva M.V., Heavy Metal Atmospheric Deposition Study in Moscow Region, Russia, *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, Vol. 103, pp. 435–440.
- Volkova E.A., Khramtsov V.N., Opyt otsenki dinamicheskogo sostoyaniya rastitel'nosti na osnove krupnomasshtabnoi karty sovremennogo rastitel'nogo pokrova (na primere territorii "Levashovskii les", Sankt-Peterburg) (Experience in assessing the dynamic state of vegetation based on a large-scale map of modern vegetation (On the example of the area "Levashovskiy les", St. Petersburg)), *Geobotanicheskoe kartografirovanie*, 2019, No. 2019, pp. 39–56.
- Wang K., Wang T., Liu X., A Review: Individual Tree Species Classification Using Integrated Airborne LiDAR and Optical Imagery with a Focus on the Urban Environment, *Forests*, 2019, Vol. 10, No. 1.