

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СМЕШАННЫХ НАСАЖДЕНИЙ МЕТОДАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

М.В. Покоева¹, А.М. Ярославцев²

¹Институт лесоведения РАН, 143030, Московская обл., п/о Успенское, ул. Советская, д. 21

²ФГБОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49

mprokoeva@yandex.ru

Проведены научные исследования однородной территории смешанного леса, сочетающие классические лесохозяйственные и геоботанические исследования с помощью современных методов дистанционного зондирования Земли с использованием беспилотных летательных аппаратов. Объектом исследования являлась однородная территория смешанного леса. Установлены основные лесообразующие породы: клен остролистный (*Acer platanoides* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.). Построены цифровая модель поверхности и геодезически привязанный ортофотоплан. Адаптирован и проверен новый доступный метод неинвазивного измерения индекса листовой поверхности. Дана оценка индекса листовой поверхности по модифицированному методу Чианучи и Кутини, путем комплексного пересчета данных вегетационных индексов и карты высот растительности. Получены значимые линейные зависимости между индексом листовой поверхности и нормализованным относительным индексом растительности только для двух пород — сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) и клена остролистного (*Acer platanoides* L.). Рассчитана доля обследованной территории для преобладающих пород. Согласно экологическому мониторингу уточнены данные по видовому составу, представлена оценка экологической продуктивности смешанных лесов.

Ключевые слова: индекс листовой поверхности, фотограмметрия, методы дистанционного зондирования Земли

Ссылка для цитирования: Покоева М.В., Ярославцев А.М. Экологические исследования смешанных насаждений методами дистанционного зондирования // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 3. С. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-33-38

Необходимость осуществления регулярно-го экологического мониторинга состояния лесов обусловлена их непрерывной динамикой вследствие влияния природных и антропогенных факторов, таких, как пожары, вырубки, техногенные загрязнения и некоторых других, масштабы проявления которых существенно варьируются в зависимости от региона. Леса, расположенные в пределах Москвы — мегаполисе с многомиллионным населением, подвержены постоянной антропогенной нагрузке, что выражается в высоком уровне загрязнения атмосферы и почвенного покрова, изменениях гидрологического режима вследствие строительства дорог, прокладки коммуникаций, вырубки лесов в целях последующей застройки территории, а также повышенной рекреационной нагрузке.

Аэрофотосъемка с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) особо широко применяется в последние годы в практике лесного хозяйства, поскольку является оперативной и может осуществляться в условиях повышенной облачности. Высокое пространственное разрешение БПЛА позволяет вести экологическую оценку состояния насаждений на уровне отдельных растений. Кроме того, возможность вести съемку в точно заданное время позволяет более точно оценивать состояние растительности [1].

Цель работы

Работа проводилась в рамках большого научно-го исследования — комплексного экологического мониторинга состояния древостоя лесной опытной дачи (ЛЮД) Тимирязевской академии. Основной задачей была проверка и адаптация нового доступного неинвазивного метода измерения индекса листовой поверхности (LAI) с использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Материалы и методы

Территория ЛЮД расположена в Северном административном округе в северо-западной части города Москвы на территории парка Московской сельхозакадемии (МСХА) имени Тимирязева и составляет юго-западную часть ее землепользования. По природным условиям она входит в подзону смешанных хвойно-широколиственных лесов южной тайги. Почвенный покров изученных участков представлен дерново-подзолистыми почвами с разной степенью развития гумусового горизонта [2].

На рассматриваемой территории проведены комплексные исследования, сочетавшие в себе как классические геоботанические и лесоводческие изыскания, так и современные методы ДЗЗ с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Выявлены лесообразующие породы объекта исследования: клен остролистный (*Acer platanoides* L.), дуб черешчатый (*Quercus robur* L.), липа мелколистная (*Tilia Cordata* Mill.), сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.), лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) [3], что было использовано для изучения экологических характеристик смешанных насаждений.

Экологическая оценка лесов требует подтверждения показателей, доступных для определения с использованием ДЗЗ, которые позволяют оценить структуру и состояние лесов по эффективности выполнения ими средозащитных и биосферных функций в условиях повышенной антропогенной нагрузки. Для этого целесообразно использовать показатели степени покрытия территории лесами, породного состава насаждений и их физиологического состояния.

По нормализованному относительному индексу растительности (NDVI) — простому показателю количественной оценки фотосинтетически активной биомассы, определяют плотность и состояние растительности [4].

По индексу листовой поверхности (LAI) — интегральному показателю широко применяющемуся в экологическом моделировании, дают оценку биомассы и продуктивности лесных экосистем [4].

Наиболее распространенным до недавнего времени был прямой подсчет этого индекса путем сбора листы с изучаемой территории. Однако метод оказался очень трудоемким и не всегда осуществим. Поэтому возникла необходимость отыскать способы непрямого определения LAI.

Неинвазивным методом определения LAI сегодня является сканирование площади листовой поверхности с малых БПЛА с помощью активных дальномеров оптического диапазона (лидаров; транслитерация с Light Identification Detection and Ranging). Несмотря на то, что этот метод применяется все чаще, высокая стоимость самих лидаров делает его недоступным для большинства отечественных исследователей [5–7].

Альтернативой лидарному сканированию площади листовой поверхности может стать фотограмметрическая обработка стереоснимков с высокой степенью перекрытия. Несмотря на то, что качество полученных снимков в первых опубликованных работах вызывало большое сомнение, ныне пришли к выводу, что это вполне подходящий метод для оценки состояния верхнего яруса древостоя [8, 9].

Аэрофотосъемка проводилась с помощью БПЛА DJI Phantom 4 на высоте 100 м от точки взлета над земной поверхностью. Фронтальное перекрытие между отдельными снимками составляло 90 %, боковое — 60 %. В результате

фотограмметрической обработки были получены ортофотопланы в формате GeoTIF, составленные из более чем 500 геодезически привязанных ортопроектированных снимков высокого разрешения, полученных в результате аэрофотосъемки на высоте 100 м от точки взлета. Создание ортофотоплана и фотограмметрическая обработка проводились с помощью программы Agisoft Metashape professional 1.3.

В ходе фотограмметрической обработки провели выравнивание стереопар геодезически привязанных цифровых изображений, построение трехмерного облака точек, расчет из трехмерного облака точек карты высот — цифровой модели поверхности (DSM) и, наконец, построение геодезически привязанного ортофотоплана по данным цифровой модели поверхности [10–12].

На последующих этапах осуществили расчет высот растительности. Для этого проводилась классификация трехмерного облака точек и в отдельную группу выделялись точки, которые относятся к земной поверхности. Из облака точек данной группы строилась цифровая модель рельефа (DEM), т. к. цифровая модель рельефа и цифровая модель поверхности были получены в виде географически привязанной матрицы значений возвышений, то цифровая модель высот растительности может быть получена в результате поэлементного вычитания значений первой матрицы из второй: $CH0M = DSM - DEM$ [13].

С помощью интерактивного дешифрирования ортофотоплана на рассмотренном участке были выделены отдельные деревья хвойных и широколиственных пород. Для каждой кроны был создан отдельный полигон. Идентификация по пород осуществлялась по дешифровочным признакам — структуре и форме кроны, неоднородности и интенсивности окраски листовых пластинок, форме ветвей [14–16].

Оценка индекса листовой поверхности производилась по модифицированному методу Чианучи и Кутини, путем комплексного пересчета по данным вегетационных индексов и карты высот растительности [17, 18]:

$$LAI = \frac{\ln(P(0))}{\Omega_0 0,85}, \quad (1)$$

где LAI — индекс листовой поверхности $m^2 m^{-2}$;
 Ω_0 — степень перекрытия листовых пластинок,
 $P(0)$ — доля земной поверхности, не покрытая листьями.

Использованная в формуле (1) константа 0,85 характеризует наклон листьев для смешанных лесов бореальной зоны.

Степень перекрытия листовых пластинок рассчитывалась по формуле

$$\Omega_0 = \frac{\ln \left[\frac{P(0)}{F_{mr}} \right] \left[\frac{1 - F_{mr}}{1 - P(0)} \right]}{\ln \left[\frac{P(0)}{F_{mr}} \right] \left[\frac{1 - F_{mr}}{1 - P(0)} \right]}, \quad (2)$$

где F_{mr} — доля общей проекции кроны на земную поверхность, не покрытую листьями.

Для того чтобы определить наличие или отсутствие растительности для каждого отдельного пикселя ортофото с помощью калькулятора растров программного комплекса Quantum GIS 3.4 был рассчитан вегетационный индекс GLA путем линейных преобразований значений в каждом из цветовых каналов:

$$GLA = \frac{2G - R - B}{2G + R + B}. \quad (3)$$

Все точки, для которых значения GLA были выше 0,2, считались покрытыми зеленой растительностью. Поскольку порозность крон считается характеристикой растения ее рассчитывают на площадь равную примерно четверти кроны — в нашем случае 2 м²:

$$F_{mr} = \frac{S(GLA < 0,2)}{2}. \quad (4)$$

Для расчета «доли разрывов», был использован индекс GLA и цифровая модель высот растений (CHM). Точка считалась относящейся к разрыву, если значение $GLA < 0,2$ и высота растений не превышала 12 м, что соответствовало примерно половине средней высоты древостоя. Так как «доля разрывов» считается характеристикой древостоя, ее рассчитывают на площадь участков, покрытых однородной растительностью. Для выделения таких участков использовались выделы согласно карте лесотаксации ЛОД 2009 г.:

$$\overline{P(0)} = \frac{S(GLA < 0,2 \text{ и } CHM < 12)}{S_{\text{выдела}}}. \quad (5)$$

Расчет значения LAI проводился в программном комплексе Quantum GIS 3.4 с помощью инструментов — калькулятора растров и калькулятора полей. Полученные значения экспортировали в виде сетки значений индекса, рассчитанных для каждого пикселя ортофотоплана, в виде ортофотоплана, окрашенного согласно выбранной цветовой схеме (рис. 1).

Результаты и обсуждение

Результаты интерактивного дешифрирования пород деревьев и его сравнение с результатами таксации 2009 г. показали, что за данный промежуток времени в породном составе в настоящее время нельзя выделить области с преобладанием

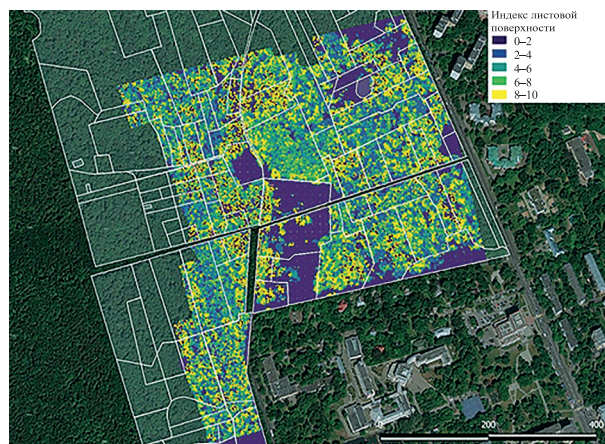


Рис. 1. Картограмма распределения значений индекса листовой поверхности, по выделам, построенным на основе данных лесотаксационного описания Лесной опытной дачи Тимирязевской академии 2009 г.

Fig. 1. Map of the distribution of leaf surface index values (laid down) for trial areas, based on data from the forest taxing description of the Timiryazev forest experimental dacha 2009

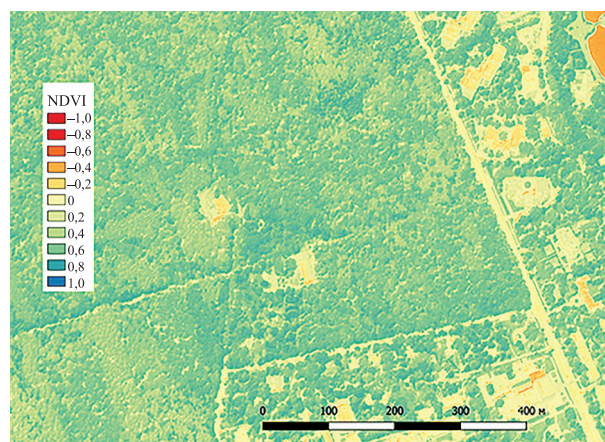


Рис. 2. Распределение нормализованного относительного индекса растительности на обследованной территории

Fig. 2. Distribution of normalized difference vegetation index in the surveyed area

только одной породы, так как из породного состава 2009 г. произошло выпадение вяза и практически полное выпадение березы. Для современного состояния породного состава преобладающими породами являются: сосна, лиственница, клен и дуб. Доля обследованной территории для разных пород составила: для лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) — 51 % площади, сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) — 35 %, клен остролистный (*Acer platanoides* L.) — 8 % и дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) — 6 % площади.

Количественная характеристика показателя NDVI (рис. 2) демонстрирует, что индекс по территории распространен равномерно, принимает значения от 0,45 до 0,65 для территории покрытой растительностью. Области с отрицательными значениями отражены красным цветом и его от-

**Средние значения, форма и сила
линейной связи показателей LAI и NDVI
для разных пород**

Average values, shape, and strength of the LAI and NDVI
linear bond for different breeds

Порода	NDVI	LAI	$LAI = a \cdot NDVI + b$	R^2
<i>Larix sibirica</i> Ledeb.	0,51	6,2	$a = -9,7716,$ $b = 10,433$	0,19
<i>Pinus sylvestris</i> L.	0,45	8,6	$a = 32,164,$ $b = -9,8395$	0,48
<i>Acer platanoides</i> L.	0,54	5,2	$a = 62,739,$ $b = -28,776$	0,51
<i>Quercus robur</i> L.	0,53	3,1	$a = 14,064,$ $b = -4,6685$	0,35

тенками, принимают значения от $-0,49$ до $-0,1$ — это дома, тропинки.

Среднее значение NDVI для основных доминирующих пород были близки, в то время как средние значения LAI для разных пород значительно отличались (таблица). Средние значения LAI между хвойными и широколиственными породами отличались примерно в 2 раза, что хорошо согласуется с литературными данными [19, 20]. Значимые линейные зависимости между индексом листовой поверхности и нормализованным относительным индексом растительности были получены только для двух пород — сосны обыкновенной и клена остролистного (см. таблицу).

Выводы

В ходе работы был адаптирован и проверен новый доступный метод неинвазивного измерения LAI. Обработка данных, полученных новым методом, показала, что диапазон значений LAI для юго-восточного участка ЛОД составил 5–9 для хвойных пород и 2–6 — для широколиственных. Оценка экологической продуктивности смешанных лесов сделана с помощью регрессионного анализа нормализованного вегетационного индекса (NDVI), полученному в результате инфракрасной съемки и индекса листовой поверхности (LAI), полученному в результате съемки экшн-камерой. Результаты показали, что NDVI по территории распространен равномерно, диапазон положительных значений составил от 0,45 до 0,65. Области с отрицательными значениями — от $-0,49$ до $-0,1$ — дороги, дома, пешеходные тропы. Актуализирован породный состав обследованной части ЛОД Тимирязевской академии. Установлены преобладающие породы: лиственница сибирская (*Larix sibirica* Ledeb.) — 51 % площади, сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) — 35 % площади, клен остролистный (*Acer platanoides* L.) — 8 % и дуб черешчатый (*Quercus robur* L.) — 6 % площади. Сравнив нынешние данные с полученными в 2009 г., можно заключить, что из общего

состава древостоя произошло полное выпадение вяза и почти полное выпадение березы. Согласно последним исследованиям по изучению экологических характеристик и оценке основных таксационных показателей, несмотря на неизбежные потери (ветровалы, буреломы, ураганы, засухи, заморозки, вытаптывание лесной территории Тимирязевского парка горожанами, уничтожение подроста и т. д.) древостой ЛОД Тимирязевской академии находится в удовлетворительном состоянии и еще долгие годы будет являться уникальным лесным массивом не только России, но и всей Европы.

Список литературы

- [1] Воробьев О.Н. Дистанционный мониторинг городских лесов. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Экология. Природопользование, 2015. № 1. С. 5–21.
- [2] Наумов В.Д., Родионов Б.С., Гемонов А.В. Сравнительная оценка почв и растительности на пробных площадях лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии, 2014. № 2. С. 5–18.
- [3] Дубенок Н.Н., Кузьмичев В.В., Лебедев А.В. Динамика лесного фонда Лесной опытной дачи РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева за 150 лет // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии, 2018. № 4. С. 5–19.
- [4] Харин Н.Г. Возможности использования вегетационного индекса (NDVI) для изучения фенологии и состава лесов России // Исследование земли из космоса, 2006. № 3. С. 89–96.
- [5] Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D.J. LIDAR remote sensing for ecosystem studies // Bioscience, 2002, no. 52, pp. 20–30.
- [6] Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
- [7] Hansen M.C., Roy D.P., Lindquist E., Adusei B., Justice C.O., Altstatt A. A. Method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin // Remote Sensing of Environment, 2008, no. 112, pp. 2495–2513.
- [8] Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Демишева Е.Н., Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование, 2015. № 4. С. 57–72.
- [9] Смирнов К.Ю., Гемонов А.В., Боева А.С., Рябцева Н.В., Чистяков С.А. К вопросу о применении квадрокоптеров для автоматической оценки лесопатологического и фитосанитарного состояния насаждений // Вклад особо охраняемых природных территорий в экологическую устойчивость регионов: Современное состояние и перспективы. Материалы всерос. (с междунар. участием) конф. Кологрив, 20–21 сентября 2018 г. / под ред. А.В. Лебедева. Кологрив: ФГБУ «Государственный природный заповедник «Кологривский лес» имени М.Г. Сидницына», 2018. С. 290–294.
- [10] Zhang Z., Gerke M., Vosselman G., Ying Yang M. Filtering photogrammetric point clouds using standard lidar filters towards DTM generation // ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information

- Sciences, 2018, no. 2.
DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018
- [11] Козодеров В.В., Дмитриев Е.В., Каменцев В.П. Система обработки самолетных изображений лесных экосистем по данным высокого спектрального и пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса, 2013, № 6. С. 57–57.
- [12] Кашкин В.Б., Сухинин А.И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений. М.: Логос, 2001. 264 с.
- [13] Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual / Ed. D.F. Maune. Maryland, USA: ASPRS, 2007, 655 p.
- [14] Алешко Р.А., Гурьев А.Т. Методика тематического дешифрирования аэрокосмических снимков таежных лесов с использованием методов системного анализа // Вестник Северного (Арктического) Федерального университета. Сер.: Естественные науки, 2013. № 3. 132 с.
- [15] Верхунов П.М. Изучение строения древостоев. Методические указания по диплоному проектированию. Йошкар-Ола: Марийский политехнический институт имени М. Горького, 1981. 45 с.
- [16] Дмитриев Е.В., Козодеров В.В., Дементьев А.О., Сафонова А.Н. Комбинирование классификаторов в задаче тематической обработки гиперспектральных аэрокосмических изображений // Оптоэлектроника, приборостроение и обработка данных, 2018. № 3. С. 213–221.
- [17] Richardson A.D., Braswell B., Hollinger D.Y., Jenkins J.C., Ollinger S.V. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology // *Oecologia*, 2009, no. 19, pp. 1417–1428.
- [18] Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastrì C., Rindinella A., Corona P. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, t. 47, pp. 60–68.
- [19] Уткин А.И., Ермолова Л.С., Уткина И.А. Площадь поверхности лесных растений: сущность, параметры, использование. М.: Наука, 2008. 290 с.
- [20] Рулев А.С., Юферев В.Г., Пугачева А.М. Инновационная технология лесомелиоративного обустройства деградированных ландшафтов на основе ГИС-технологий и космоснимков // *Инноватика и экспертиза: науч. тр.*, 2017. № 2 (20). С. 33–45.

Сведения об авторах

Покоева Мария Владимировна — аспирант Института лесоведения РАН, mpokoeva@yandex.ru
Ярославцев Алексей Михайлович — канд. биол. наук, ст. преподаватель кафедры экологии ФГБОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева, yaroslavtsevam@gmail.com

Поступила в редакцию 14.10.2019.

Принята к публикации 21.04.2020.

ENVIRONMENTAL RESEARCHES OF MIXED STANS BY REMOTE SENSING METHODS

M.V. Pokoeva¹, A.M. Yaroslavtsev²

¹Institute of Forest Science RAS, 21, Sovetskaya st., village Uspenskoe, Odintsovo district, 143030, Moscow reg., Russia

²Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 49, Timiryazevskaya st., 127550, Moscow, Russia

mpokoeva@yandex.ru

A scientific study was conducted on the territory of Petrovsko-razumovskoe Nature Reserve, combining classical forestry, geobotanical research and modern methods of remote sensing of the Earth using unmanned aerial vehicles. The object of the study was a homogeneous area of a mixed forest. The main forest-forming species are Norway maple (*Acer platanoides* L.), Common oak (*Quercus robur* L.), Small-leaved Linden (*Tilia Cordata* Mill.), Common pine (*Pinus sylvestris* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.). A digital surface model and a geodesically linked orthophotomap have been built. The new available non-invasive method for measuring leaf surface index has been adapted and tested. Assessment of the leaf surface index was carried out by the modified method of Chianuchi and Kutini, by complex recalculation according to vegetation indices and vegetation elevation maps. Significant linear relationships between the leaf surface index and the normalized relative vegetation index were obtained only for two species — pine (*Pinus sylvestris* L.) and maple (*Acer platanoides* L.) for the current state of the rock composition, the predominant species are pine (*Pinus sylvestris* L.), Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.), maple (*Acer platanoides* L.), oak (*Quercus robur* L.). The share of the surveyed territory for different breeds was Siberian larch (*Larix sibirica* Ledeb.) — 51 % of the area, pine (*Pinus sylvestris* L.) — 35 % of the area, maple (*Acer platanoides*) — 8 % and oak (*Quercus robur* L.) — 6 % of the area. The ecological monitoring updated the species composition, assessed the ecological productivity of mixed forests by the normalized vegetation index obtained by infrared scanning and the leaf area index obtained by the camera.

Keywords: leaf area index, photogrammetry, remote sensing

Suggested citation: Pokoeva M.V., Yaroslavtsev A.M. *Ekologicheskoe issledovanie smeshannykh nasazhdeniy metodami distantsionnogo zondirovaniya* [Environmental researches of mixed stans by remote sensing methods]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 3, pp. 33–38. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-3-33-38

References

- [1] Vorobiev O.N. *Distantsionnyy monitoring gorodskikh lesov* [Remote monitoring of urban forests]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of the Volga state technological University. Ecology. Nature management], 2015, no. 1, pp. 5–21.
- [2] Naumov V.D., Rodionov B.S., Gemonov A.V. *Sravnitel'naya otsenka pochvy i rastitel'nosti na probnykh ploshchadyakh lesnoy opytnoy dachi RGAU-MSKHA imeni K. A. Timiryazeva* [Comparative assessment of soil and vegetation on sample areas of the forest experimental garden of the Russian state agrarian University-MTAA named after K. A. Timiryazev]. Izvestiya Timiryazevskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Izvestia of Timiryazev agricultural Academy], 2014, no. 2, pp. 5–18.
- [3] Dubenok N.N., Kuzmichev V.V., Lebedev A.V. *Dinamika lesnogo fonda Lesnoy opytnoy dachi RGAU-MSKHA imeni K.A. Timiryazeva za 150 let* [Dynamics of the forest Fund of the Forest experimental dacha of the Timiryazev state agrarian University for 150 years]. Izvestiya Timiryazevskoy Sel'skokhozyaystvennoy Akademii [Izvestia of Timiryazev agricultural Academy], 2018, no. 4, pp. 5–19.
- [4] Harin N.G. *Vozmozhnosti ispol'zovaniya vegetatsionnogo indeksa (NDVI) dlya izucheniya fenologii i sostava lesov Rossii. Issledovanie zemli iz Kosmosa* [The possibility of using the vegetation index (NDVI) to study the phenology and composition of forests in Russia. Exploration of the earth from Space], 2006, no. 3, pp. 89–96.
- [5] Lefsky M.A., Cohen W.B., Parker G.G., Harding D.J. LIDAR remote sensing for ecosystem studies. *Bioscience*, 2002, no. 52, pp. 20–30.
- [6] Schovengerdt R.A. *Distantsionnoe zondirovanie. Metody i modeli obrabotki izobrazheniy* [Remote sensing. Methods and models of image processing]. Moscow: Tekhnosfera [Technosphere], 2010, 560 p.
- [7] Hansen M.C., Roy D.P., Lindquist E., Adusei B., Justice C.O., Altstatt A.A. Method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. *Remote Sensing of Environment*, 2008, no. 112, pp. 2495–2513.
- [8] Vorobiev O.N., Kurbanov E.A., Gubaev A.V., Demisheva E.N., *Metodika poshagovoy klassifikatsii sputnikovyykh snimkov dlya tematicheskogo kartirovaniya lesov* [Method of step-by-step classification of satellite images for thematic mapping of forests]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie [Bulletin of the Volga state technological University. Series: The Forest. Ecology. Nature management], 2015, no. 4, pp. 57–72.
- [9] Smirnov K. Yu., Gemonov A.V., Boeva A.S., Ryabtseva N.V., Chistyakov S.A. *K voprosu o primeneniі kvadrokovoy avtomaticheskoy otsenki lesopatologicheskogo i fitosanitarnogo sostoyaniya nasazhdeniy* [On the use of quadcopters for automatic assessment of forest pathology and phytosanitary condition of plantations]. Vklad osobo okhranyaemykh prirodnykh territoriy v ekologicheskuyu ustoychivost' regionov: Sovremennoe sostoyanie i perspektivy Materialy vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) konferentsii. Otvetstvennyy redaktor A.V. Lebedev. [Contribution of specially protected natural territories to the ecological sustainability of regions: Current state and prospects Materials of the all-Russian (with international participation) conference. Executive editor A.V. Lebedev], 2018, pp. 290–294.
- [10] Zhang Z., Gerke M., Vosselman G., Ying Yang M. Filtering photogrammetric point clouds using standard lidar filters towards DTM generation. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 2018, no. 2. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-319-2018
- [11] Kozoderov V.V., Dmitriev E.V., Kamentsev V.P. *Sistema obrabotki samoletnykh izobrazheniy lesnykh ekosistem po dannym vysokogo spektral'nogo i prostranstvennogo razresheniya* [System for processing airplane images of forest ecosystems based on high spectral and spatial resolution data]. Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Research from space], 2013, no. 6, pp. 57–57.
- [12] Kashkin V.B., Sukhinin A.I. *Distantsionnoe zondirovanie Zemli iz kosmosa. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy* [Remote sensing of the Earth from space. Digital image processing]. Moscow: Logos, 2001, 264 p.
- [13] Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual. Ed. D.F. Maune. Maryland, USA: ASPRS, 2007, 655 p.
- [14] Aleshko R.A., Guryev A.T. *Metodika tematicheskogo deshifirovaniya aerokosmicheskikh snimkov taezhnykh lesov s ispol'zovaniem metodov sistemnogo analiza* [The method of thematic decoding of aerospace images of taiga forests using methods of system analysis]. Arctic Environmental Research, 2013, 132 p.
- [15] Verhunov P.M. *Izuchenie stroeniya drevostoev. Metodicheskie ukazaniya po diplomnomu proektirovaniyu* [Studying the structure of stands. Guidelines for diploma design]. Yoshkar-Ola: Mariyskiy politekhnicheskiy institut imeni M. Gor'kogo [Mari Polytechnic Institute named after M. Gorky], 1981, 45 p.
- [16] Dmitriev E.V., Kozoderov V.V., Dementiev A.O., Safonova A.N. *Kombinirovaniye klassifikatorov v zadache tematicheskoy obrabotki giperspektral'nykh aerokosmicheskikh izobrazheniy* [Combining classifiers in the task of thematic processing of hyperspectral aerospace images]. Optoelektronika, priborostroeniye i obrabotka dannykh [Optoelectro-Nika, instrument engineering and data processing], 2018, no. 3, pp. 213–221.
- [17] Richardson A.D., Braswell B., Hollinger D.Y., Jenkins J.C., Ollinger S.V. Near-surface remote sensing of spatial and temporal variation in canopy phenology. *Oecologia*, 2009, no. 19, pp. 1417–1428.
- [18] Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastri C., Rindinella A., Corona P. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, t. 47, pp. 60–68.
- [19] Utkin A.I., Ermolova L.S., Utkina I.A. *Ploshchad' poverkhnosti lesnykh rasteniy: sushchnost', parametry, ispol'zovanie* [Surface Area of forest plants: essence, parameters, use] Rossiyskaya akademiya nauk, Institut lesovedeniya [Russian Academy of Sciences, Institute of forestry]. Moscow: Nauka [Science], 2008, 290 p.
- [20] Rulev A.S., Yuferev V.G., Pugacheva A.M. *Innovatsionnaya tekhnologiya lesomeliyativnogo obustroystva degradirovannykh landshtaflov na osnovе GIS-tekhnologii i kosmosnimkov* [Innovative technology for forest reclamation arrangement of degraded landscapes based on GIS technologies and satellite imagery] Innovatika i ekspertiza: nauchnye trudy [Innovation and Expertise: Scientific Works], 2017, no. 2 (20), pp. 33–45.

Authors' information

Pokoeva Mariya Vladimirovna — Pg. Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences (ILAN), mpokoeva@yandex.ru

Yaroslavtsev Aleksey Mikhaylovich — Cand. Sci. (Biology), Senior Lecturer of the Department of ecology in RSAU–MTAA named after K.A. Timiryazev, yaroslavtsevam@gmail.com

Received 14.10.2019.

Accepted for publication 21.04.2020.