

УДК 528.88.044.1:630.1(476) + 528.94:630.1.004(476)

## КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Н. А. ШЕСТАКОВ<sup>1)</sup>, А. А. ТОПАЗ<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

**Аннотация.** Представлены методика и результаты картографирования лесной растительности путем автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования Земли (изображений «Landsat-8», «Landsat-9», «Sentinel-2»). С использованием средств программных комплексов *ENVI* (версия 5.6) и *ArcMap* (версия 10.7) произведена комплексная цифровая обработка космических снимков. На основе результатов тематической обработки мультиспектральных спутниковых данных и математико-статистического анализа получены значения коэффициентов спектральной яркости шести лесообразующих пород: сосны, ели, березы, ольхи черной, осины и дуба. Анализ спектральной отражательной способности, выполненный в программах *Statistica* (версия 10) и *Microsoft Office Excel*, позволил установить спектральные дешифровочные признаки исследуемых пород с учетом сезонных изменений и определить оптимальные для дешифрирования временные сроки. На основе результатов автоматизированного дешифрирования по данным спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» выполнено среднemasштабное (1 : 125 000) картографирование лесной растительности на примере территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры». Путем анализа разновременных данных дистанционного зондирования Земли произведено автоматизированное обнаружение изменений лесного покрова с 2013 по 2022 г. (по данным снимка «Landsat-8») и с 2018 по 2022 г. (по данным снимка «Sentinel-2»). Составлены 12 карт лесной растительности, отражающих актуальное состояние и динамику лесного покрова заказника, 2 из которых представлены в статье. Картографическое оформление результатов тематической обработки мультиспектральных спутниковых изображений осуществлено в программах *ArcGIS (ArcMap)* (версия 10.7) и *Adobe Illustrator* (версия 2019 г.).

**Ключевые слова:** лесная растительность; картографирование; дешифрирование; данные дистанционного зондирования Земли; «Landsat-8»; «Landsat-9»; «Sentinel-2».

### Образец цитирования:

Шестаков НА, Топаз АА. Картографирование лесной растительности на основе автоматизированного дешифрирования по данным дистанционного зондирования Земли. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024;1:98–112.  
EDN: EBGHCK

### For citation:

Shastakou MA, Tapaz AA. Mapping of the forest vegetation on automated interpretation of remote sensing data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;1:98–112. Russian.  
EDN: EBGHCK

### Авторы:

**Никита Алексеевич Шестаков** – аспирант кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики. Научный руководитель – А. А. Топаз.  
**Антонина Анатольевна Топаз** – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

### Authors:

**Mikita A. Shastakou**, postgraduate student at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.  
*nishestakov23@gmail.com*  
**Antonina A. Tapaz**, PhD (geography), docent; head of the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.  
*topaz\_antonina@mail.ru*

MAPPING OF THE FOREST VEGETATION BASED  
ON AUTOMATED INTERPRETATION OF REMOTE SENSING DATAM. A. SHASTAKOU<sup>a</sup>, A. A. TAPAZ<sup>a</sup><sup>a</sup>Belarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: M. A. Shastakou (nishestakov23@gmail.com)

**Abstract.** The article presents the technique and results of forest vegetation mapping based on automated interpretation of «Landsat-8», «Landsat-9», and «Sentinel-2» remote sensing data. The comprehensive digital processing of the satellite data was done using the tools of *ENVI* (version 5.6) and *ArcMap* (version 10.7) software packages. The values of spectral reflectance coefficients for six forest-forming species (pine, spruce, birch, black alder, aspen, oak) were obtained from the results of thematic data processing and mathematical and statistical analysis. The analysis of the spectral reflectance was performed in *Statistica* (version 10) and *Microsoft Office Excel* programmes. It allowed to establish the spectral deciphering signs of the studied species considering seasonal changes and determine the optimal times for the classification. The forest cover of the territory of Republican Landscape Reserve «Ozyory» was mapping on the medium-scale (1 : 125 000) level on the basis of the results of automated interpretation «Landsat-8», «Landsat-9», and «Sentinel-2» images. The automated detection of changes in the forest cover condition was based on multi-temporal remote sensing data – «Landsat-8» (2013–2022) and «Sentinel-2» (2018–2022) data. The article contains 2 of 12 maps of forest vegetation that show the current state and dynamics of the forest cover of the reserve territory. Cartographic design of the results of thematic processing of multispectral satellite images was carried out in *ArcGIS (ArcMap)* (version 10.7) and *Adobe Illustrator* (version 2019) programmes.

**Keywords:** forest vegetation; mapping; interpretation; remote sensing data; «Landsat-8»; «Landsat-9»; «Sentinel-2».

## Введение

Леса и лесные ресурсы имеют важное значение для устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь, обеспечения ее экономической, энергетической, промышленной, экологической и продовольственной безопасности. По информации Национального статистического комитета Республики Беларусь, в 2021 г. на долю лесопокрытых территорий приходилось 40,1 % площади страны.

С учетом сформировавшейся системы ведения лесного хозяйства и имеющихся подходов к картографированию лесов в Беларуси внимание уделено в первую очередь крупномасштабному картографированию (1 : 10 000 – 1 : 50 000), для реализации которого используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) главным образом высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (как правило, материалы аэрофотосъемок) [1; 2]. При этом картографирование лесов в масштабе 1 : 100 000 и мельче выполняется путем генерализации содержания крупномасштабных карт. Применение современных данных ДЗЗ высокого и относительно высокого пространственного разрешения, а также технологий и методов геоинформационного анализа позволяет проводить тематическое картографирование на средне- и мелкомасштабном уровне на основе результатов цифровой обработки данных ДЗЗ. С опорой на опыт картографирования лесов на различном масштабном уровне в России [3–6], странах Европейского союза [7–9], Китае [10], Канаде, США, ряде других государств и регионов предполагается возможным и эффективным использование данных космического ДЗЗ в целях среднемасштабного картографирования лесов Беларуси.

Среди всего разнообразия современных данных ДЗЗ на сегодняшний день можно выделить мультиспектральные спутниковые снимки «Landsat-8», «Landsat-9» (Геологическая служба США) и «Sentinel-2» (Европейское космическое агентство), получившие широкое практическое применение в исследованиях наземных (в том числе растительных) покровов [3; 5–10]. Обеспеченность территории Беларуси данными ДЗЗ, отсутствие необходимости в проведении их полной фотограмметрической обработки и финансовых затрат на выполнение разносезонных съемок (в отличие от аэросъемок), обращение к специализированному программному обеспечению позволяют использовать эти изображения в качестве источника информации при составлении среднемасштабных карт лесной растительности.

Таким образом, цель исследования состояла в оценке возможностей среднемасштабного картографирования лесной растительности на основе результатов цифровой обработки мультиспектральных спутниковых данных (снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2»).

## Материалы и методы исследования

В качестве объекта картографирования выбран лесной покров республиканского ландшафтного заказника «Озёры», расположенного на северо-востоке Гродненского района и в западной части Щучинского района Гродненской области. По состоянию на 2018 г. лесами было покрыто 90,6 % природоохранной

территории<sup>1</sup>. Среди лесобразующих пород, получивших наибольшее распространение в этой местности, можно выделить шесть пород (семь видов): 1) сосну обыкновенную (*Pinus sylvestris*); 2) ель европейскую (*Picea abies*); 3) березу повислую (*Betula pendula*) и березу пушистую (*B. pubescens*); 4) ольху черную (*Alnus glutinosa*); 5) осину, или тополь дрожащий (*Populus tremula*); 6) дуб черешчатый (*Quercus robur*). С учетом информации о породном составе лесонасаждений, представленной в материалах лесоустройства Гродненского и Скидельского лесхозов, вычленены пять тестовых участков (ТУ) в пределах заказника (рис. 1).

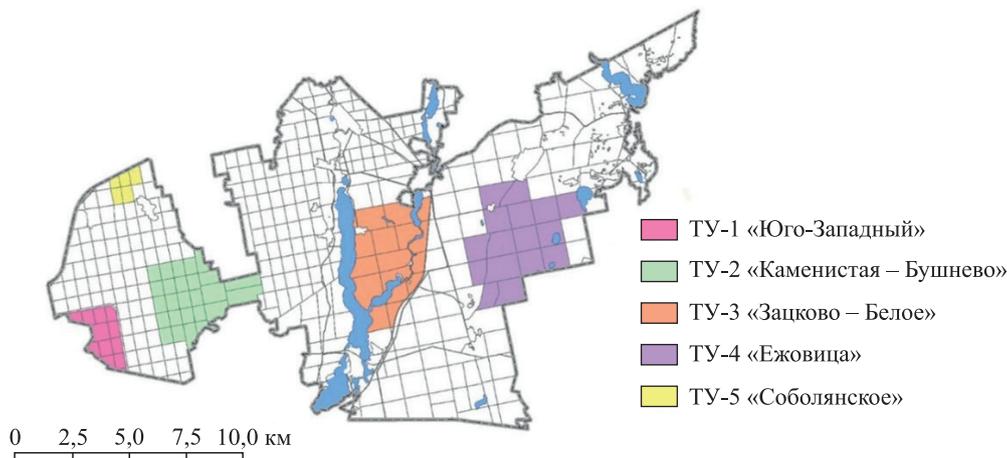


Рис. 1. ТУ в пределах территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры»

Fig. 1. Test sites within Republican Landscape Reserve «Ozyory»

Исходными данными ДЗЗ послужили мультиспектральные спутниковые снимки, полученные с космических летательных аппаратов «Landsat-8», «Landsat-9»<sup>2</sup> и «Sentinel-2A», «Sentinel-2B»<sup>3</sup>. Следует отметить, что сходство в спектральном диапазоне съемки каналов съемочных систем позволяет задействовать данные спутниковых снимков при решении задач в рамках общей тематики, а разница в пространственном разрешении (30 м для снимков «Landsat-8», «Landsat-9», 10 м для снимков «Sentinel-2») дает возможность картографировать объект на различном масштабном уровне, а также изучать и оценивать влияние аэрокосмической генерализации на изобразительные свойства снимка и результаты тематической обработки (табл. 1).

Таблица 1

Сопоставление съемочных систем спутников «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» по спектральному и пространственному разрешению

Table 1

Comparing of «Landsat-8», «Landsat-9», and «Sentinel-2» satellite sensors by spectral and geometric resolution

«Landsat-8» (OLI), «Landsat-9» (OLI-2)			«Sentinel-2A» (MSI), «Sentinel-2B» (MSI)		
Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м	Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м
В-1 «Coastal aerosol»	0,443	30	В-1 «Ultra blue»	0,443	60
В-2 «Blue»	0,482	30	В-2 «Blue»	0,490	10
В-3 «Green»	0,561	30	В-3 «Green»	0,560	10
В-8 «Panchromatic»	0,590	15	–	–	–

<sup>1</sup>План управления республиканским ландшафтным заказником «Озёры»: отчет о НИР / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по биоресурсам; рук. Н. А. Юргенсон. Минск, 2017. 157 с.

<sup>2</sup>«Landsat» levels of processing [Electronic resource] // United States Geological Survey. URL: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-levels-processing> (date of access: 10.08.2023).

<sup>3</sup>«Sentinel-2» mission guide [Electronic resource] // Sentinel online. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (date of access: 10.08.2023).

Окончание табл. 1  
Ending of the table 1

«Landsat-8» (OLI), «Landsat-9» (OLI-2)			«Sentinel-2A» (MSI), «Sentinel-2B» (MSI)		
Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м	Канал	Спектральное разрешение, мкм	Пространственное разрешение, м
B-4 «Red»	0,654	30	B-4 «Red»	0,665	10
–	–	–	B-5 «VRE-1»	0,705	20
–	–	–	B-6 «VRE-2»	0,740	20
–	–	–	B-7 «VRE-3»	0,783	20
–	–	–	B-8 «NIR»	0,842	10
B-5 «NIR»	0,864	30	B-8A «NIR narrow»	0,865	20
–	–	–	B-9 «Water vapor»	0,945	60
B-9 «Cirrus»	1,374	30	B-10 «SWIR cirrus»	1,375	60
B-6 «SWIR-1»	1,609	30	B-11 «SWIR»	1,610	20
B-7 «SWIR-2»	2,201	30	B-12 «SWIR»	2,190	20

Примечания: 1. Прочерком обозначены каналы, которые не имеют аналогов; светло-серым и серым фоном выделены каналы, используемые в исследовании, только серым фоном – каналы, наиболее информативные для изучения лесной растительности. 2. В скобках указаны названия съемочных систем (сенсоров) космических аппаратов (OLI – operational land imager, MSI – multispectral imager).

Отбор данных ДЗЗ как основы для картографирования лесной растительности требует учета ряда факторов, связанных с физиологическими особенностями объекта исследования, физико-географическими условиями местности, а также с техническими возможностями съемочных систем. К наиболее значимым факторам можно отнести: специфику вегетационного периода лесной растительности, разнообразной по типу (хвойная и лиственная) и породному составу (шесть пород); присутствие, характер размещения облаков, их теней; периодичность съемки; сопоставимость дат проведения съемки для четырех съемочных систем.

В результате приобретения снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» из источников открытого доступа были сформированы два блока исходных данных ДЗЗ: первый блок включает актуальные разноресурсные снимки (2021, 2022), необходимые для исследования сезонных изменений спектральной отражательной способности лесонасаждений пород, проведения автоматизированного дешифрирования и картографирования породного состава лесонасаждений, а второй блок – архивные снимки (2013–2019), предназначенные для картографирования динамики лесного покрова по результатам обнаружения изменений. Общее число полученных снимков составило 45 ед., из них снимков «Landsat-8» насчитывается 16 ед., снимков «Landsat-9» – 3 ед., снимков «Sentinel-2A» – 16 ед., снимков «Sentinel-2B» – 10 ед.

Особое внимание в работе уделено методам обработки данных ДЗЗ, которые можно разделить на методы предварительной обработки и методы тематической обработки<sup>4</sup>. Цифровая обработка мультиспектральных спутниковых снимков производилась на базе программного комплекса (ПК) *ENVI* (версия 5.6) и геоинформационной системы (ГИС) *ArcGIS (ArcMap)* (версия 10.7). Методика картографирования лесной растительности на основе цифровой обработки данных ДЗЗ (изображений «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2») представлена на рис. 2.

Цель подготовки и предобработки данных ДЗЗ – формирование набора разновременных многоканальных изображений, полученных на основе снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» исследуемой территории и пригодных для выполнения тематической обработки. В ПК *ENVI* (версия 5.6) получены фрагменты мультиспектральных спутниковых изображений путем вырезания исходных снимков по границе республиканского ландшафтного заказника «Озёры». Для части снимков «Landsat-8», «Landsat-9» выполнена геометрическая коррекция, заключающаяся в трансформировании спутниковых изображений, в результате чего был произведен пересчет координат для 10 снимков с номенклатурным обозначением центра сцены 187/022 в системе разграфки WRS-2 из зоны 34N в зону 35N.

<sup>4</sup>Тоназ А. А. Методы дистанционных исследований : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец.: 1-31 02 01 «География (по направлениям)», 1-31 02 03 «Космоаэрокартография», 1-33 01 02 «Геоэкология», 1-56 02 02 «Геоинформационные системы (по направлениям)». Минск : БГУ, 2022. 127 с.



Рис. 2. Технологическая схема обработки данных ДЗЗ для картографирования лесной растительности  
 Fig. 2. Technological scheme of remote sensing data processing for mapping of the forest vegetation

Актуальной проблемой при количественном анализе данных ДЗЗ, полученных в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, является грамотный учет преобразований проходящего через атмосферную толщу излучения, а также помех, вызванных возможными дефектами съемочной аппаратуры (радиометрическая калибровка и атмосферная коррекция)<sup>5</sup>. Высокий уровень обработки используемых данных ДЗЗ (L2SP для снимков «Landsat-8», «Landsat-9», L2A для снимков «Sentinel-2») предусматривает устранение технических ошибок сенсора и нивелирование влияния атмосферной среды. Следовательно, в проведении пользователем атмосферной коррекции они не нуждались. Подготовленные в ПК *ENVI* (версия 5.6) изображения «Landsat-8», «Landsat-9» включают 7 спектральных каналов ( $\lambda = 0,43\text{--}2,29$  мкм) с пространственным разрешением 30 м, изображения «Sentinel-2» – 11 спектральных каналов ( $\lambda = 0,43\text{--}2,28$  мкм) с пространственным разрешением 10–60 м.

Центральное место в схеме тематической обработки данных ДЗЗ занимает дешифрирование – комплекс мероприятий, направленных на получение информации об объектах местности и явлениях географической среды по их изображению на данных ДЗЗ. Современные методы дешифрирования основываются на знании закономерностей воспроизведения оптических, геометрических, спектральных свойств изображаемых объектов и явлений на материалах дистанционных наблюдений, а также их пространственного размещения<sup>6</sup>. Дешифрирование лесного покрова (как и любых других объектов земной поверхности) базируется на использовании дешифровочных признаков – наиболее характерных свойств объектов или их взаимосвязей, нашедших отражение на материалах дистанционных съемок и позволяющих распознавать исследуемый объект<sup>7</sup>.

<sup>5</sup>Тоназ А. А., Шестаков Н. А. Цифровая обработка космических снимков : электрон. учеб.-метод. комплекс для спец. 1-31 02 03 «Космоаэрокартография». Минск : БГУ, 2023. 95 с.

<sup>6</sup>Тоназ А. А. Методы дистанционных исследований... 127 с.

<sup>7</sup>Шихов А. Н., Герасимов А. П., Пономарчук А. И. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения : учеб. пособие. Пермь : Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2020. 191 с.

Дешифрирование лесной растительности республиканского ландшафтного заказника «Озёры» по снимкам «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» включало три этапа: на первом этапе проводилось визуальное дешифрирование породного состава лесонасаждений, на втором этапе выполнялся анализ спектральных дешифровочных признаков лесной растительности на основе значений коэффициентов спектральной яркости (КСЯ), на третьем этапе осуществлялось автоматизированное дешифрирование лесной растительности путем анализа величин КСЯ. Визуальное дешифрирование подразумевало решение двух задач: 1) получение эталонных изображений лесонасаждений за разные сезоны (табл. 2); 2) выделение областей интереса по изображению лесонасаждений для последующего извлечения из них спектральной информации в виде значений КСЯ.

Таблица 2

Эталонные изображения лесообразующих пород по данным спутникового снимка «Sentinel-2» за 18 января 2021 г.

Table 2

Reference images of forest-forming species based on «Sentinel-2» satellite image data for 18 January 2021

Диапазон съемки (канал)	Порода					
	Сосна	Ель	Береза	Ольха черная	Осина	Дуб
RGB (4-3-2)						
NRG (8-4-3)						
NIR (8)						

Получение спектральной информации об исследуемых породах в ПК *ENVI* (версия 5.6) осуществлялось путем извлечения средних значений яркости изображения в пределах указанных областей интереса. Местоположение областей интереса определялось рядом критериев: они располагались в пределах ТУ; отбирались участки с однородным спектральным откликом, свободные от дымки, облаков, а также их теней; для снимков за февраль и март во внимание принималось присутствие снежного покрова. Размеры областей интереса подбирались с учетом размеров выделов и пространственного разрешения используемых данных ДЗЗ. Каждая область интереса представляла собой квадрат размером 3 × 3 пк для изображений «Landsat-8», «Landsat-9» и квадрат размером 9 × 9 пк для изображений «Sentinel-2A», «Sentinel-2B», что соответствует в действительности области размером 90 × 90 м (рис. 3).

Извлечение спектральной информации из областей интереса выполнялось в ПК *ENVI* (версия 5.6) инструментом *statistics for all ROIs*. Получены значения КСЯ шести исследуемых пород (сосны, ели, березы, ольхи черной, осины и дуба) за установленный период наблюдений (с февраля по ноябрь) в 2021 и 2022 гг. Эти величины подверглись математико-статистической обработке (анализу нормальности распределения данных (рис. 4, табл. 3), корреляционному анализу (см. рис. 4)).

В ходе статистического анализа спектральных данных (на примере величин КСЯ сосны за вторую декаду июня) был установлен нормальный одномодальный тип распределения, о чем свидетельствуют значения базовых описательных статистик (см. табл. 3), а также проведенные в ПК *Statistica* (версия 10) тесты на нормальность (см. рис. 4) с использованием критерия нормальности Колмогорова – Смирнова ( $p > 0,2$ ), критерия Лиллиефорса и критерия Шапиро – Уилка ( $p > 0,05$ ).

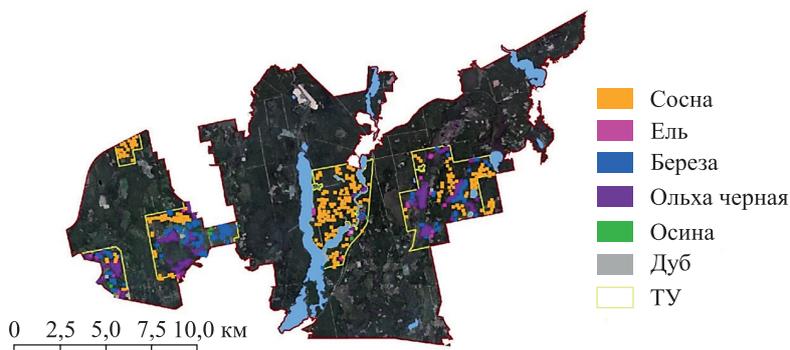


Рис. 3. Области интереса для шести лесобразующих пород республиканского ландшафтного заказника «Озёры»

Fig. 3. Regions of interest for six forest-forming species of the Republican Landscape Reserve «Ozyory»

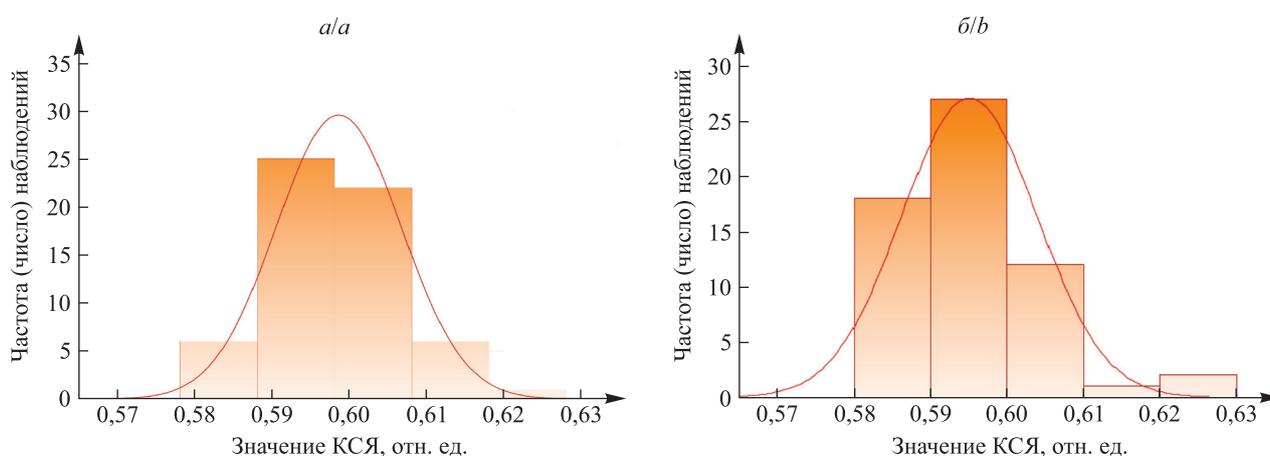


Рис. 4. Гистограмма распределения спектральных данных (значений КСЯ сосны в ИК-диапазоне):

*a* – данные спутникового снимка «Landsat-8» за 19 июня 2021 г.;  
*б* – данные спутникового снимка «Sentinel-2B» за 18 июня 2021 г.

Fig. 4. Histogram of spectral data distribution (spectral reflectance values of pine in the NIR range):

*a* – «Landsat-8» satellite image data for 19 June 2021;  
*b* – «Sentinel-2B» satellite image data for 18 June 2021

Таблица 3

**Результаты анализа распределения данных  
на примере средних значений КСЯ сосны в ИК-диапазоне  
за вторую декаду июня**

Table 3

**The results of the data distribution analysis  
on the example of the average reflectance values of pine in the NIR range  
for the second decade of June**

Показатели	Спутниковый снимок «Landsat-8» (NIR (канал 5)) за 19 июня 2021 г.	Спутниковый снимок «Sentinel-2» (NIR (канал 8)) за 18 июня 2021 г.
Объем выборки	60	60
Среднее арифметическое	0,601	0,595
Среднее геометрическое	0,600	0,595
Среднее гармоническое	0,600	0,594
Медиана	0,599	0,595
Минимум	0,584	0,589

Окончание табл. 3  
Ending of the table 3

Показатели	Спутниковый снимок «Landsat-8» (NIR (канал 5)) за 19 июня 2021 г.	Спутниковый снимок «Sentinel-2» (NIR (канал 8)) за 18 июня 2021 г.
Максимум	0,627	0,620
Дисперсия	0,001	0,001
Стандартное отклонение	0,008	0,009
Коэффициент вариации	1,349	1,487
Асимметрия	0,599	0,001
Стандартная ошибка асимметрии	0,309	0,709
Экссесс	1,031	0,309
Стандартная ошибка эксцесса	0,608	0,779

На основе корреляционного анализа (рис. 5) была установлена прямая линейная связь между количественными значениями яркости пикселей лесообразующих пород, извлеченными в фиолетовой ( $\lambda = 0,43-0,45$  мкм), синей ( $\lambda = 0,45-0,51$  мкм), зеленой ( $\lambda = 0,53-0,59$  мкм), красной ( $\lambda = 0,64-0,68$  мкм) зонах видимого диапазона, а также в ближней ( $\lambda = 0,85-0,88$  мкм) и средней ( $\lambda = 1,56-2,29$  мкм) зонах ИК-диапазона спектра по данным спутниковых снимков «Landsat-8» (каналы 1–7) и «Sentinel-2В» (каналы 1–4, 8, 11, 12) за 18–19 июня 2021 г. Величина коэффициента корреляции по Пирсону ( $r = 0,929$ ) указывает на то, что связь наблюдается, она прямая и сильная. Наличие зависимости между значениями яркости, полученными по данным спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» в общих спектральных диапазонах (каналах), доказано<sup>8</sup>.

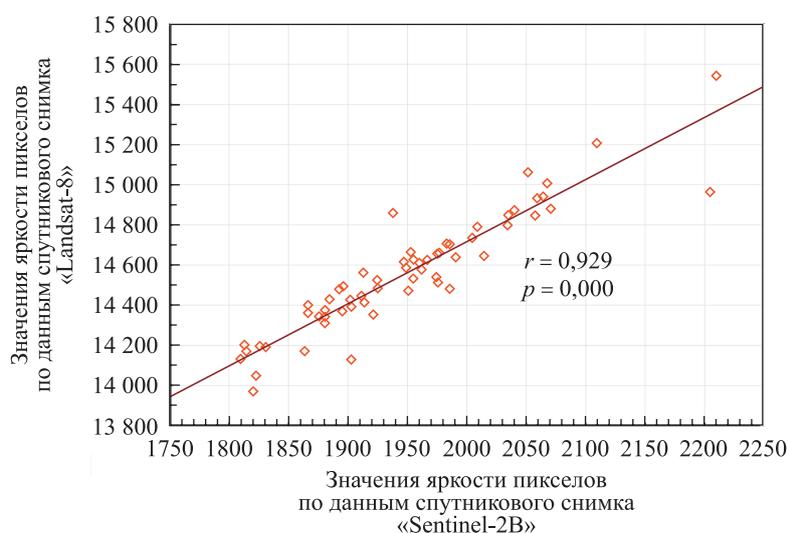


Рис. 5. Установление корреляции между количественными значениями яркости пикселей сосны, полученными по данным спутниковых снимков «Landsat-8» (за 19 июня 2021 г.) и «Sentinel-2В» (за 18 июня 2021 г.) в ИК-диапазоне

Fig. 5. Calculation of the correlation between digital number quantitative values of pine obtained from «Landsat-8» (for 19 June 2021) and «Sentinel-2В» (for 18 June 2021) satellite images data in the NIR range

Спектральная отражательная способность – одна из главных характеристик, непосредственно проявляющихся на данных ДЗЗ. Она выступает физической основой дешифрирования объектов<sup>9</sup>. Анализ спектральной отражательной способности лесной растительности на основе значений КСЯ показал, что этот параметр может быть использован в качестве надежного спектрального дешифровочного признака при дешифрировании типов леса (хвойного, лиственного) и породного состава насаждений. Отмечается высокая разделяемость хвойных и лиственных пород, однако в разрезе групп пород уровень разделяемости

<sup>8</sup>Аладьев В. З., Харитонов В. Н. Курс общей теории статистики. Palo Alto : Fultus Corp., 2006. 256 с.

<sup>9</sup>Чертко Н. К., Карпиченко А. А. Математические методы в географии : учеб.-метод. пособие. Минск : БГУ, 2009. 199 с. ; Топаз А. А. Методы дистанционных исследований... 127 с.

ниже (рис. 6). Оптимальными сроками дешифрирования лиственных пород являются летний, осенний периоды, для дешифрирования хвойных пород подходит также весенний период.

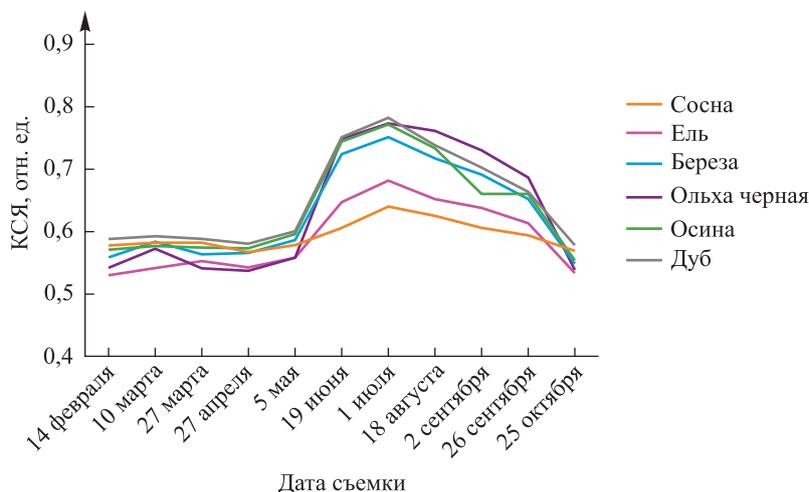


Рис. 6. Сезонные изменения в спектральной отражательной способности лесообразующих пород по данным спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» (NIR (канал 5)) за 2021 г.

Fig. 6. Seasonal changes in the spectral brightness of forest-forming species based on «Landsat-8», «Landsat-9» satellite images data (NIR (band 5)) for 2021

При компьютерной обработке данных ДЗЗ особое значение имеют методы автоматизированного дешифрирования, в частности так называемая классификация изображения. Исходя из опыта проведения классификаций по спутниковым изображениям относительно высокого пространственного разрешения, для автоматизированного дешифрирования лесной растительности территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры» был выбран алгоритм классификации с обучением по методу максимального правдоподобия. Он предполагает, что статистические данные для каждого класса подчиняются закону нормального распределения, а плотность вероятности принадлежности пиксела к определенному классу вычисляется с использованием теоремы Байеса в качестве решающего правила классификации [11].

Автоматизированное дешифрирование территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры» выполнялось по актуальным (2022) и разновременным (2013–2022) снимкам «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» в направлении дешифрирования породного состава лесонасаждений (сосны, ели, березы, ольхи черной), обнаружения изменений лесного покрова. Для проведения классификации по снимкам за 2022 г. был определен набор тематических классов, включающий водные поверхности (класс 1), почвенный покров (класс 2), травяной покров (класс 3), лесной покров, в том числе сосну (класс 4), ель (класс 5), березу (класс 6), ольху черную (класс 7). Оценка точности результатов дешифрирования породного состава лесонасаждений, травяного, почвенного покровов и водных поверхностей по данным ДЗЗ за 2022 г. (табл. 4 и 5) выполнена в ГИС ArcGIS (ArcMap (версия 10.7)) на основе 250 произвольно расположенных точек (группы инструментов сегментация и классификация) с использованием информации о лесоустройстве на территории заказника (картосхем лесонасаждений Гродненского и Скидельского лесхозов (1 : 100 000), планов лесонасаждений лесничеств (1 : 25 000), содержащих сведения о лесоустройстве за 2015, 2018 и 2021 гг.).

Автоматизированное обнаружение изменений на основе сопоставления результатов классификации по двум разновременным снимкам выполнялось в ПК ENVI (версия 5.6) с помощью набора инструментов change detection<sup>10</sup> в несколько этапов: на первом этапе осуществлялась классификация изображения (по снимку за начальную дату, по снимку за конечную дату), на втором этапе – оценка точности результатов классификации, на третьем этапе – постклассификационная обработка, на четвертом этапе реализовывалось обнаружение изменений путем сравнения результатов классификации. Обнаружение изменений лесного покрова территории заказника проводилось за 9-летний (по данным изображения «Landsat-8» за 2013–2022 гг.) и 4-летний (по данным изображения «Sentinel-2» за 2018–2022 гг.) периоды. Отсутствие снимков «Sentinel-2» с уровнем обработки L2A ранее 2018 г. обусловило меньший интервал наблюдений. Результаты представлены в табл. 6.

<sup>10</sup>ENVI [Electronic resource] // NV5 geospatial solutions. URL: <https://www.nv5geospatialsoftware.com/Products/ENVI> (date of access: 10.08.2023).

Таблица 4

Оценка точности классификации спутникового снимка «Landsat-8» за 2022 г.

Table 4

Accuracy assessment for «Landsat-8» satellite image classification for 2022

Показатели	Показатели									
	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6	Класс 7	Суммарное значение	Пользовательская точность	к-Коэффициент Коэна
Класс 1	10	0	0	0	0	0	0	10	1,000	0
Класс 2	0	10	0	0	0	0	0	10	1,000	0
Класс 3	0	0	15	0	0	0	0	15	1,000	0
Класс 4	0	0	5	111	1	0	0	117	0,948	0
Класс 5	0	0	0	14	24	2	0	40	0,600	0
Класс 6	0	0	0	3	2	27	4	36	0,750	0
Класс 7	0	0	2	0	0	3	17	22	0,772	0
Суммарное значение	10	10	22	128	27	32	21	250	0	0
Производственная точность	1,000	1,000	0,682	0,867	0,889	0,844	0,809	0	0,856	0
к-Коэффициент Коэна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,797

Таблица 5

Оценка точности классификации спутникового снимка «Sentinel-2B» за 2022 г.

Table 5

Accuracy assessment for «Sentinel-2B» satellite image classification for 2022

Показатели	Показатели									
	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4	Класс 5	Класс 6	Класс 7	Суммарное значение	Пользовательская точность	к-Коэффициент Коэна
Класс 1	9	0	0	0	0	0	0	9	1,000	0
Класс 2	0	9	0	1	0	0	0	10	0,900	0
Класс 3	0	0	11	0	0	0	1	12	0,917	0
Класс 4	0	0	0	125	1	0	0	126	0,992	0
Класс 5	0	0	0	13	22	2	0	37	0,594	0
Класс 6	0	0	1	0	0	26	3	30	0,866	0
Класс 7	0	0	0	0	0	3	23	26	0,884	0
Суммарное значение	9	9	12	139	23	31	27	250	0	0
Производственная точность	1,000	1,000	0,917	0,899	0,956	0,839	0,850	0	0,900	0
к-Коэффициент Коэна	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,851

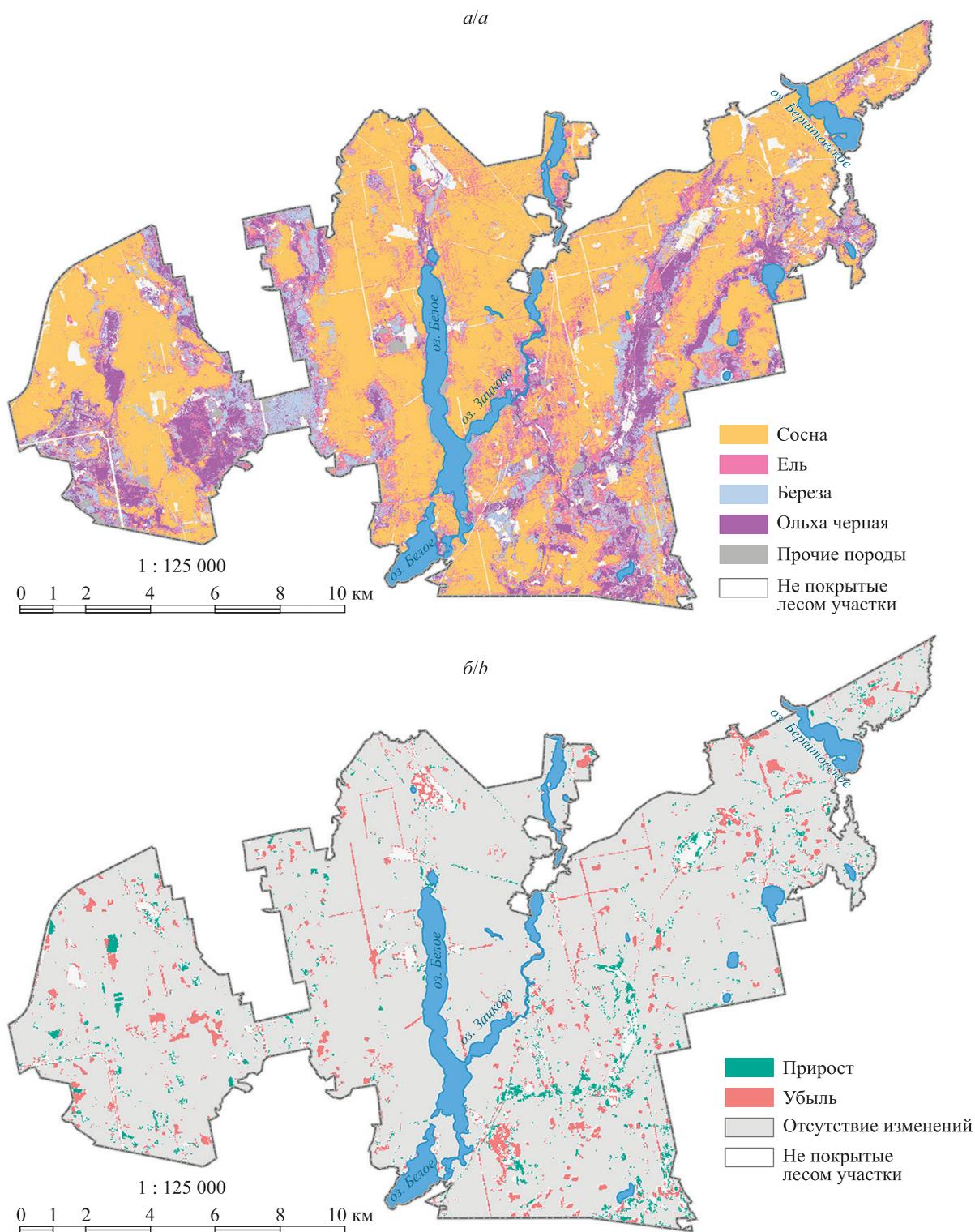


Рис. 7. Карты лесной растительности республиканского ландшафтного заказника «Озёры»:  
а – карта породного состава лесонасаждений  
(по данным спутникового снимка «Sentinel-2» за 2022 г.);  
б – карта изменений в состоянии лесного покрова  
(по данным спутникового снимка «Landsat-8» за 2013–2022 гг.)

Fig. 7. Maps of the forest vegetation of Republican Landscape Reserve «Ozyory»:  
а – map of the species composition of forests  
(based on «Sentinel-2» satellite image data for 2022);  
б – map of the forest cover changes  
(based on «Landsat-8» satellite image data for 2013–2022)

Таблица 6

**Расчет количественных изменений лесного покрова территории республиканского ландшафтного заказника «Озёры» по данным спутниковых снимков «Sentinel-2» (за 4 года) и «Landsat-8» (за 9 лет)**

Table 6

**Calculation of quantitative changes in the forest cover of the territory of the Republican Landscape Reserve «Ozyory» based on «Sentinel-2» (for 4 years) and «Landsat-8» (for 9 years) satellite images data**

Период	Класс	Количество пикселей	Лесной покров	
			Доля, %	Площадь, га
4 года	Прирост	116 153	1,11	150,53
	Отсутствие изменений	5 105 692	96,69	13 232,41
	Убыль	58 728	2,20	301,08
9 лет	Прирост	7 135	1,21	165,59
	Отсутствие изменений	565 245	96,19	13 137,98
	Убыль	15 284	2,60	355,82

На основе результатов автоматизированного дешифрирования безоблачных спутниковых снимков «Landsat-8» (за 18 августа 2022 г.) и «Sentinel-2B» (за 12 августа 2022 г.) составлены 12 карт лесной растительности республиканского ландшафтного заказника «Озёры» в масштабе 1 : 125 000, а именно 6 карт распространения хвойных и лиственных пород, 2 карты породного состава лесонасаждений заказника, 2 карты динамики распространения хвойных и лиственных пород (с 2013 по 2022 г.), а также 2 карты обнаружения изменений в состоянии лесного покрова за 9 лет (по данным изображения «Landsat-8») и 6 лет (по данным изображения «Sentinel-2»). На рис. 7 представлен оформленный результат тематической обработки данных ДЗЗ – карта породного состава лесонасаждений (по данным снимка «Sentinel-2» за 2022 г.) и карта изменений в состоянии лесного покрова (по данным снимка «Landsat-8» за 2013–2022 гг.).

Составление и оформление карт выполнено в плавающей компоновке. Для картографического изображения элементов тематического содержания карт (распространения лесной растительности, изменений в пространственном размещении лесов) выбран способ ареалов. Масштаб приведенных на рис. 7 карт изменен (уменьшен).

### Результаты и их обсуждение

Анализ значений КСЯ шести лесообразующих пород республиканского ландшафтного заказника «Озёры» на основе данных спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» позволил сделать ряд заключений об особенностях их спектрально-отражательных свойств.

1. Отмечается закономерный ход спектральных кривых для хвойных и лиственных пород: фиксируются низкие величины КСЯ в фиолетовой и синей зонах видимого спектра, максимальные величины в зеленой зоне и минимальные величины в красной зоне, наблюдаются резкий рост значений КСЯ с общим максимумом в ближней зоне ИК-диапазона и их понижение в средней зоне.

2. Отчетливо прослеживаются различия между хвойными и лиственными породами: хвойные породы характеризуются более низкими величинами КСЯ. В зоне «красного края» ( $\lambda = 0,69-0,79$  мкм) усиливаются различия в значениях КСЯ для лиственных и хвойных пород, достигая пика в ближней зоне ИК-диапазона (увеличение интервала показателей до 0,1 отн. ед.). Каналы 5–7 и 8А (снимок «Sentinel-2») позволяют установить различия внутри лиственных пород: во второй декаде июня спектральные кривые для березы, ольхи черной, осины находятся ниже, чем спектральные кривые для дуба.

3. Имеются сезонные изменения в ходе кривых спектральной яркости пород. Наименьшие значения КСЯ хвойных пород наблюдаются в зимний (февраль), весенний и осенний (сентябрь, октябрь) периоды, наибольшие – в летний период с максимумом в июне и июле. В конце лета и начале осени отмечается заметное снижение спектральной яркости (величины КСЯ в конце сентября и октябре сопоставимы с показателями весеннего периода). Самые низкие значения КСЯ для лиственных пород также регистрируются в зимний, весенний и осенний периоды. Спектральные кривые за март и май

характеризуются слабой выраженностью максимума в зеленой зоне и минимума в красной зоне. В июне и июле фиксируются максимальные значения КСЯ листвы, которые постепенно снижаются в августе. В феврале – апреле и ноябре спектральная яркость лиственных пород ниже, чем спектральная яркость хвойных пород (отсутствие активной фотосинтезирующей лиственной массы). Стоит отметить более выраженное разделение спектральных кривых в ближней зоне ИК-диапазона в сравнении с хвойными породами, что объясняется высокой динамичностью изменений в структуре и внешней окраске листвы, протекающих на протяжении всего вегетационного периода растений. Для березы характерны самые низкие значения КСЯ среди лиственных пород в течение большей части вегетационного периода. Для ольхи черной максимальные значения КСЯ отмечаются в конце июля – начале сентября. Спектральная кривая осины занимает промежуточное положение, а пик яркости для листвы дуба наблюдается в июне и июле.

4. На основе сопоставления значений КСЯ шести лесобразующих пород за исследуемый период установлено, что высокий уровень достоверности распознавания лесных пород фиксируется при наиболее типичном ходе кривых спектральной яркости, т. е. в летний период (июнь, июль), а также в начале осени. Для хвойных пород уровень разделимости выше, чем для лиственных пород, они дешифрируются увереннее на фоне лиственных пород и в остальные сезоны. При дешифрировании лиственных пород необходимо брать во внимание также осенние снимки, поскольку морфологические изменения листвы различных пород наступают в разное время, что может быть использовано в качестве индикатора при определении той или иной породы. Весенние снимки могут применяться при дешифрировании хвойных пород, выгодно выделяющихся в сравнении с лиственными породами в данное время года.

Оценка точности результатов автоматизированного дешифрирования (см. табл. 4 и 5) показала следующее: для данных спутникового снимка «Landsat-8» общая точность классификации составляет 85,6 %, к-коэффициент Коэна – 0,797, максимальные значения производственной и пользовательской точности характерны для водных поверхностей, травяного и почвенного покровов, а также для хвойных лесобразующих пород (свыше 85 %). Для данных спутникового снимка «Sentinel-2» общая точность классификации равняется 90,0 %, к-коэффициент Коэна – 0,851, максимумы производственной и пользовательской точности свойственны водным поверхностям, травяному и почвенному покровам, а среди лесобразующих пород они типичны для сосны (свыше 85 %, за исключением ели).

По результатам автоматизированного обнаружения изменений за 9 лет и 4 года (см. табл. 6) отмечается общее сокращение площади лесопокрытых земель заказника на 2,2 % за 2018–2022 гг. и на 2,6 % за 2013–2022 гг. Данный факт связан с проведением санитарных рубок (сведением участков, пораженных насекомыми-вредителями, болезнями, рубками ухода за лесом (осветлением, прочисткой, прореживанием, проходными рубками), реконструкции, обновления, формирования (переформирования) насаждений). Регистрируется увеличение площади лесопокрытых земель на отдельных участках (на 1,11 % за 2018–2022 гг., на 1,21 % за 2013–2022 гг.), сопряженное с зарастанием рубок, распространением древесно-кустарниковой растительности за границы лесопокрытых земель и проведением лесовосстановительных работ (в западной и северной частях заказника). В целом состояние лесного покрова территории оценивается как устойчивое (за 9 лет площадь лесопокрытых земель сократилась менее чем на 3 %).

### Заключение

Применение мультиспектральных данных ДЗЗ (спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2») в сочетании с комплексным подходом к их цифровой обработке и математико-статистическому анализу позволяет выполнять картографирование лесной растительности Беларуси на среднемасштабном уровне. С использованием методов предварительной и тематической обработки данных ДЗЗ установлены основные дешифровочные признаки шести наиболее распространенных на территории Беларуси лесобразующих пород, произведен анализ значений КСЯ, выполнено автоматизированное дешифрирование лесной растительности (определены типы леса и породного состава насаждений, обнаружены изменения лесного покрова), по результатам которого составлены 12 карт лесной растительности, отражающих актуальное состояние и динамику лесного покрова республиканского ландшафтного заказника «Озёры».

Наличие в свободном доступе актуальных и архивных спутниковых снимков «Landsat-8», «Landsat-9» и «Sentinel-2» территории Беларуси дает возможность картографировать типы растительности, типы леса, породный состав лесонасаждений, нарушения лесного покрова, а также ретроспективно картографировать леса (составлять карты прошлых лет, динамики, обнаружения изменений). Регулярность

спутниковых съемок, достаточно высокое временное, пространственное и спектральное разрешение данных, значительный территориальный охват обеспечивают выполнение среднемасштабного лесного картографирования без финансовых и временных затрат на проведение аэросъемок или полевых обследований.

### Библиографические ссылки

1. Груммо ДГ, Зеленкевич НА, Цвирко РВ. Инвентаризация и оценка современного состояния биологического разнообразия Национального парка «Беловежская пушча» с помощью дистанционных и геоинформационных методов. В: Кольмакова ЕГ, редактор. *Современные направления развития физической географии: научные и образовательные аспекты в целях устойчивого развития. Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию факультета географии и геоинформатики Белорусского государственного университета и 65-летию Белорусского географического общества; 13–15 ноября 2019 г.; Минск, Беларусь*. Минск: БГУ; 2019. с. 353–356.
2. Толкач ИВ, Саевич ФК. Спектральные и яркостные характеристики основных лесообразующих пород на снимках сканера Leica ADS100. *Труды БГТУ. Серия 1, Лесное хозяйство*. 2016;1:24–27. EDN: WHDMBT.
3. Денисова АЮ, Кавеленова ЛМ, Корчиков ЕС, Прохорова НБ, Терентьева ДА, Федосеев БА. Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019;16(4):86–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
4. Жарко ВО, Барталев СА. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014;11(3):159–170. EDN: THXYBP.
5. Курбанов ЭА, Воробьев ОН, Меньшиков ЛН, Смирнова ЛН. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018;15(5):154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
6. Шихов АН, Семакина АВ. Картографирование растительного покрова Пермского края по спутниковым снимкам Landsat. *Географический вестник*. 2022;1:150–164. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.
7. Person M, Lindberg E, Reese H. Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1794. DOI: 10.3390/rs10111794.
8. Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D, Ostapowicz K. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1197. DOI: 10.3390/rs11101197.
9. Pravalie R, Sirodov I, Nita IA, Patriche C, Dumitrascu M, Rosca B, et al. NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*. 2022;136:108629. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.
10. Mengyu Wang, Yi Zheng, Chengquan Huang, Ran Meng, Yong Pang, Wen Jia, et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystem*. 2022;9(3):100032. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100032.
11. Зраенко СМ, Емельянов АЮ. Алгоритмы классификации изображений в пакете прикладных программ ENVI. В: Цветков АВ, редактор. *Новые образовательные технологии в вузе. Материалы Шестой Международной научно-практической конференции. Часть 2; 2–5 февраля 2009 г.; Екатеринбург, Россия*. Екатеринбург: Уральский государственный технический университет – УПИ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; 2009. с. 131–134.

### References

1. Grummo DG, Zeliankevich NA, Tsvirko RV. Inventory and evaluation of the modern condition of the biological diversity of the National Park «Belovezhskaya Pushcha» using remote and geoinformational methods. In: Kol'makova EG, editor. *Sovremennyye napravleniya razvitiya fizicheskoi geografii: nauchnye i obrazovatel'nye aspekty v tselyakh ustoychivogo razvitiya. Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posvyashchennoi 85-letiyu fakul'teta geografii i geoinformatiki Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta i 65-letiyu Belorusskogo geograficheskogo obshchestva; 13–15 noyabrya 2019 g.; Minsk, Belarus* [Modern directions of development of physical geography: scientific and educational aspects for sustainable development. Proceedings of the International scientific and practical conference dedicated to the 85<sup>th</sup> anniversary of the faculty of geography and geoinformatics of the Belarusian State University and the 65<sup>th</sup> anniversary of the Belarusian Geographical Society; 2019 November 13–15; Minsk, Belarus]. Minsk: Belarusian State University; 2019. p. 353–356. Russian.
2. Tolkach IV, Sayevich FK. Spectral and brightness characteristics of the main forest-forming species on images of the scanner Leica ADS100. *Proceedings of BSTU. Series 1, Forestry*. 2016;1:24–27. Russian. EDN: WHDMBT.
3. Denisova AYU, Kavelenova LM, Korchikov ES, Prokhorova NB, Terentyeva DA, Fedoseev BA. Tree species classification in Samara Region using Sentinel-2 remote sensing images and forest inventory data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019;16(4):86–101. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
4. Zharko VO, Bartalev SA. Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2014;11(3):159–170. Russian. EDN: THXYBP.
5. Kurbanov EA, Vorobiev ON, Menshikov LN, Smirnova LN. Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018;15(5):154–166. Russian. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
6. Shikhov AN, Semakina AV. Mapping of the vegetation cover of the Perm Region based on Landsat satellite images. *Geographical Bulletin*. 2022;1:150–164. Russian. DOI: 10.17072/2079-7877-2022-1-150-164.

7. Person M, Lindberg E, Reese H. Tree species classification with multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1794. DOI: 10.3390/rs10111794.
8. Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D, Ostapowicz K. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series. *Remote Sensing*. 2019;11(10):1197. DOI: 10.3390/rs11101197.
9. Pravalie R, Sirodov I, Nita IA, Patriche C, Dumitrascu M, Rosca B, et al. NDVI-based ecological dynamics of forest vegetation and its relationship to climate change in Romania during 1987–2018. *Ecological Indicators*. 2022;136:108629. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108629.
10. Mengyu Wang, Yi Zheng, Chengquan Huang, Ran Meng, Yong Pang, Wen Jia, et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystem*. 2022;9(3):100032. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100032.
11. Zraenko SM, Emel'yanov AYu. [Image classification algorithms in the *ENVI* package]. In: Tsvetkov AV, editor. *Novye obrazovatel'nye tekhnologii v vuze. Materialy Shestoi Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Chast' 2; 2–5 fevralya 2009 g.; Ekaterinburg, Rossiya* [New educational technologies at the university. Proceedings of the Sixth International scientific and practical conference. Part 2; 2009 February 2–5; Yekaterinburg, Russia]. Yekaterinburg: Ural State Technical University – UPI named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 2009. p. 131–134. Russian.

Получена 15.12.2023 / исправлена 13.02.2024 / принята 29.02.2024.  
Received 15.12.2023 / revised 13.02.2024 / accepted 29.02.2024.