

УДК 630.58

А.П. Богданов, А.С. Ильинцев

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТОБРАЖЕНИЯ ЛИСТВЕННОСТИ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД НА МАТЕРИАЛАХ СЪЕМКИ SENTINEL-2

Введение. Материалы дистанционного зондирования земли (ДЗЗ) и методы, основанные на их применении, являются технической основой для проведения экологического мониторинга. Применение аэрокосмических методов позволяет эффективно проводить мониторинговые работы и научные исследования. Грамотное применение сезонных особенностей отображения древесных пород на аэрокосмоснимках повышает точность и эффективность лесоучетных работ [Жарко, Барталев, 2014]. Материалы дистанционного наблюдения могут быть основой для определения фенологических фаз путем объединения полевых исследований с временными рядами Landsat-8 и Sentinel-2 [Shen et al., 2021]. ДЗЗ является эффективным инструментом для сбора и получения информации о количественных и качественных характеристиках лесов [Rees et al., 2021]. Информация о видовом составе лесных насаждений важна для эффективного лесоуправления и для сохранения редких древесных видов и лесных экосистем. Применение серии космоснимков на территорию исследования может служить основой для анализа изменений растительного покрова [Алексеев, Черниковский, 2023] и оценки уровня биоразнообразия по состоянию ценных для сохранения биоразнообразия экосистем [Monteiro et al., 2023]. Сохранение генетического разнообразия Европейского Севера является актуальной задачей. Применение ДЗЗ может быть полезно при инвентаризации насаждений лиственницы (*Larix spp.*) [Punalekar et al., 2021].

Доступ к космической съемке широкому кругу заинтересованных лиц открывает большие возможности для картографирования древесных пород. С распространением беспилотных воздушных судов (БВС) появилась возможность делать аэроснимки с высоким пространственным разрешением, по которым можно более точно идентифицировать объекты наблюдения [Шошина и др., 2023]. В работе использованы космические снимки, вы-

полненные с космического летательного аппарата Sentinel-2 и аэрофото- снимки с беспилотного воздушного судна DJI Mini.

Благодаря высокому пространственному, спектральному и временному разрешению использование космической съемки целесообразно для изучения особенностей спектрального отображения лиственницы в осенний период и дальнейшего ее картографирования на значительной территории. Применение съемки, полученной с БВС в октябре, и проведенные полевые работы позволили выделить отдельные кроны лиственниц для дальнейшего изучения на космоснимке. Для развития автоматизированных методов дешифрирования необходимо изучение признаков дешифрирования изучаемых объектов на материалах ДЗЗ. Фенологические особенности лиственницы позволяют выделять указанную породу на снимках высокого пространственного разрешения [Богданов и др., 2023]. Комплексное использование многозональной космосъемки различного пространственного разрешения может повысить точность оценки ресурсного потенциала древостоев [Li et al., 2020]. При оценке запаса лесных насаждений на основе классификации материалов ДЗЗ с помощью машинного обучения могут совместно использоваться данные Sentinel-2 и бортового LiDAR [Yu et al., 2023].

Важным элементом выделения лиственницы является правильный подбор периода съемки, а также использование двух изображений из двух разных сезонов, что позволяет достичь точности в 90% [Grabska et al., 2019]. Также важен выбор диапазона электромагнитного спектра, в котором наиболее явно можно идентифицировать лиственницу [Kollert et al., 2021]. Визуальная оценка показала, что на многозональном космоснимке Sentinel-2 древостои с участием и преобладанием лиственницы наиболее контрастны в диапазоне съемки от 650,0 нм до 680,0 нм, поэтому для исследования выбран канал В4 с пространственным разрешением 10 м.

Для изучения особенностей спектрального отображения лиственницы на материалах космосъемки Sentinel-2 использованы определенные фенологические закономерности. На изучаемой территории практически все деревья березы освобождаются от листвы на 14 дней раньше, чем деревья лиственницы от хвои [Берлина, Зануздаева, 2015; Васина, Таланова, 2015]. Опадение хвои у лиственницы длится до середины октября [Наквасина и др., 2008]. Также известно, что лиственница наименее требовательна к температурному режиму воздуха во время опадения хвои [Кищенко, 2020].

Объектом исследования являются древостои с участием и преобладанием лиственницы и их отображение на аэрокосмоснимке.

Древесные породы могут формировать как чистые, так и смешанные древостои. Возможность выделения отдельных деревьев и древостоев на

материалах ДЗЗ определяется детальностью используемой съемки или пространственным разрешением. Для выделения отдельных крон лиственницы использована детальная съемка, полученная с БВС DJI Mini.

Материалы и методика исследования. Целью данного исследования является изучение особенностей отображения лиственницы в осенний период на материалах космосъемки, выполненной с космического аппарата Sentinel-2.

Для выполнения поставленной цели проведены следующие работы:

- подготовительные работы (поиск доступной информации и получение данных лесоустройства на территорию объекта исследования; подбор участка, методов проведения полевых работ и обработки данных);
- полевые работы (сбор данных с использованием утвержденных методик; проведение съемки с беспилотного воздушного судна);
- камеральные работы (обработка полевых материалов; загрузка космической съемки; создание ортофотоплана).

Объекты исследования – насаждения с преобладанием и участием лиственницы 76 и 92 квартала Кепинского участкового лесничества Архангельского лесничества. Площадь лесничества составляет 1,1 млн га. В состав лесничества входят 9 участковых лесничеств. В лесничестве преобладают спелые и перестойные насаждения, средний состав древостоя 75Е14С2Лц9Б+Ос¹.

Для получения таксационной характеристики древостоя выбран метод таксации круговыми площадками постоянного радиуса (КППР). Выполнен сплошной пересчет всех деревьев с замерами высот на 71 КППР радиусом 11,3 м. Полевые материалы обрабатывались принятыми в лесной таксации и вариационной статистике методами². Радиус КППР определялся в зависимости от среднего диаметра и полноты лесного насаждения³. Диаметр деревьев измерялся по точной шкале мерной вилкой с точностью 1 мм. Для определения средней высоты древесного яруса измерялась высота у 15–20

¹ Лесохозяйственный регламент Архангельского лесничества, утвержденный постановлением МПР и ЛПК Архангельской области от 28 ноября 2018 года № 50п. URL: <https://dvinaland.ru/gov/iogv/minlpk/docList/> (дата обращения: 20.01.2024).

² Третьяков С.В., Контев С.В., Наквасина Е.Н., Бахтин А.А., Ильинцев А.С., Богданов А.П., Кекишева Ю.Е. Лесная таксация. Часть 4. Закладка, таксация и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ: учебное пособие / Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. Архангельск: САФУ, 2023. 119 с.

³ Об утверждении Порядка отвода и таксации лесосек и о внесении изменений в Правила заготовки древесины и особенности заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации, утвержденные приказом Минприроды России от 1 декабря 2020 г. № 993; приказ Минприроды России от 17 октября 2022 года № 688.

деревьев каждой породы. Высоту измеряли ультразвуковым высотомером Haglof Vertex IV с точностью 0,1 м. Запас на пробной площади определялся по разрядным таблицам⁴. Состав древостоя определен на основе запасов составляющих пород. Для определения координат центров КППР использовался GPS-навигатор Garmin GPSmap 62.

Для визуализации объектов исследования использовалась геоинформационная система QGIS 3.16. На рис. 1 приведена схема расположения КППР 76 квартала.

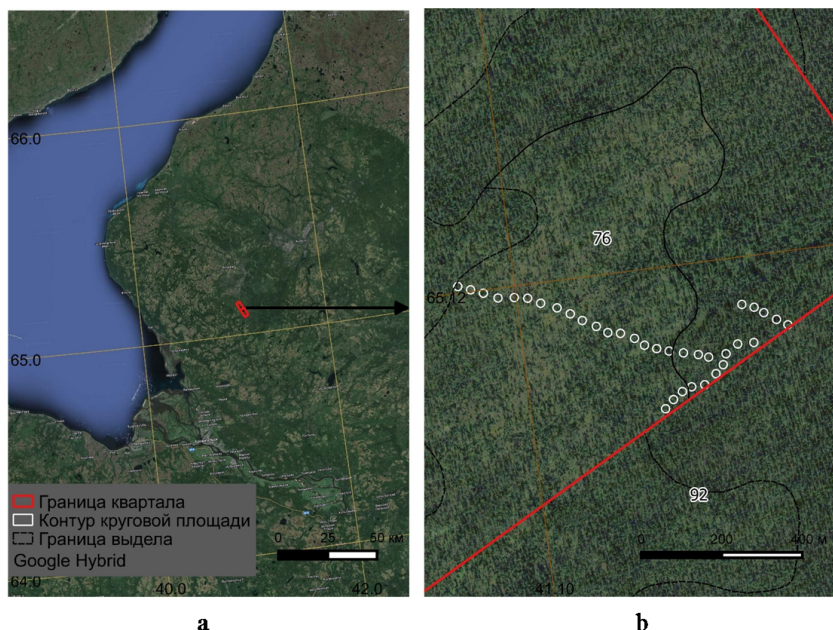


Рис. 1. Расположение КППР: а – расположение объекта исследования на карте Google Hybrid; б – схема расположения КППР внутри 76 квартала Кепинского участкового лесничества

Fig. 1. Location of the circular test areas: а – location of the research object on the Google Hybrid map; б – location of the circular test areas inside the 76 block of the Kepino forest area

⁴ Лесотаксационный справочник по северо-востоку европейской части Российской Федерации: (нормативные материалы для Ненецкого автономного округа, Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми) / Федер. агентство лесного хоз-ва, Федер. бюджет. учреждение «Сев. науч.-исслед. ин-т лесного хоз-ва»; сост.: канд. с.-х. наук Войнов Г.С. и др. Архангельск: ОАО ИПП «Правда Севера», 2012. 672 с.

Выполнение цифровой аэрофотосъемки осуществлялось с помощью БВС DJI Mini, оснащённого модулем GPS и цифровой камерой с размером матрицы 12 мегапикселей [Алешко и др., 2023]. Аэрофотосъемка проведена в октябре 2022 г. на площади 43 га. Съемка выполнена на высоте 100 м над уровнем земной поверхности, что позволило сформировать ортофотоплан детальностью до 5 см/пиксель. Фотограмметрическая обработка данных цифровой фотосъемки с БВС выполнена с помощью программного обеспечения Agisoft Metashape.

Для изучения особенностей отображения крон лиственницы на космоснимке Sentinel-2 проведены следующие работы:

1. создание набора векторных слоев в геоинформационной системе (нанесение границ КППР на картографическую подложку; выделение крон лиственницы на ортофотоплане; обрезка крон по контуру КППР);

2. подбор и загрузка материалов космической съемки на территорию исследования с помощью картографического сервиса ЕО Browser [Sentinel..., 2023];

3. определение атрибутивных характеристик КППР (площади крон лиственниц, доли горизонтальной проекции крон лиственниц по отношению к площади КППР);

4. вычисление статистических характеристик спектральной яркости каждой КППР по материалам космической съемки.

Для определения спектральной яркости на КППР использовался модуль QGIS «Зональная статистика». Результаты расчета приведены в табл. 2.

Результаты исследования. Таксационная характеристика двухъярусного насаждения приведена в табл. 1.

Таблица 1

Таксационная характеристика древостоя

Taxation characteristics of the forest stand

Ярус	Порода	Доля в составе, %	Возраст, лет	Высота, м	Диаметр, см	Сумма площадей сечений, м ² /га	Относительная полнота	Запас, м ³ /га
I	Л	100	200	25,1	43,7	11,9	0,29	142
Итого		100				11,9	0,29	142
II	Е	88	78	12	18,8	6,5	0,28	50
II	Б	12	63	9,5	11,1	1,3	0,07	7
Итого		100				7,8	0,35	57

На рис. 2 приведен фрагмент ортофотоплана с нанесенными границами КППР и контурами крон лиственниц, выделенными вручную.

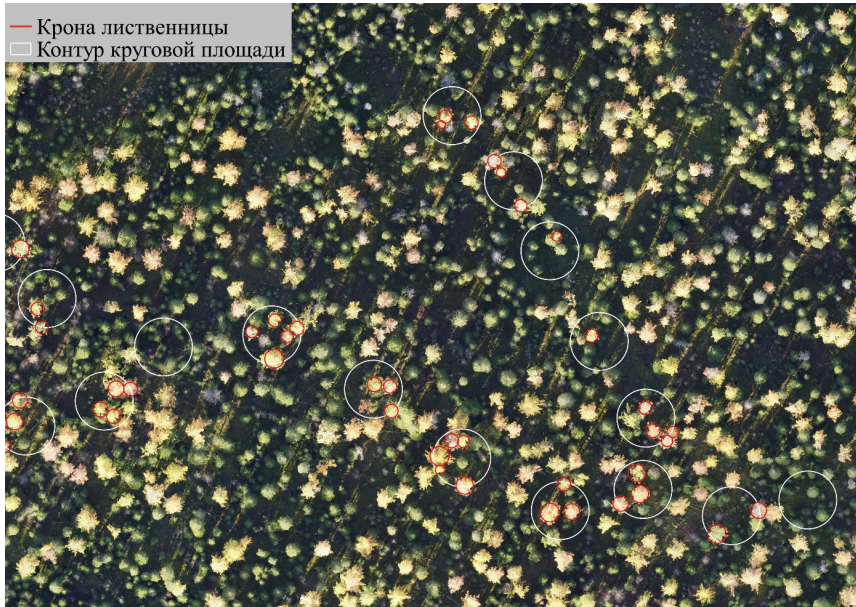


Рис. 2. Фрагмент ортофотоплана, сформированного на основе материалов аэрофотосъемки с БВС DJI Mini, выполненной встроенной камерой в октябре 2022 г.

Fig. 2. A fragment of an orthophotoplan formed on the basis of aerial photography materials from the DJI Mini UAV, made with an integrated camera in October 2022

Для оценки точности выделения лиственницы на ортофотоплане проведено сравнение с результатами полевых работ. Точность выделения крон на материалах ортофотоплана определялась по формуле (1):

$$A = \frac{N}{N_v} = \frac{97 \times 100\%}{107} = 90,7\%, \quad (1)$$

где A – точность выделения крон лиственниц, %; N – количество деревьев на круговых площадках, определяемое визуально по ортофотоплану, шт., $N = 97$; N_v – количество лиственниц на круговых площадках, определяемое при наземном перече́те, шт., $N_v = 107$.

Использование съемки с детальностью 5 см на пиксель в осенний период позволяет выделять лиственницу с точностью до 90,7%.

Для выявления особенностей отображения древостоев с участием и преобладанием лиственницы на материалах дистанционного зондирования использован многозональный снимок, выполненный космическим летательным аппаратом Sentinel-2. Для целей исследования использовался один канал (рис. 3).

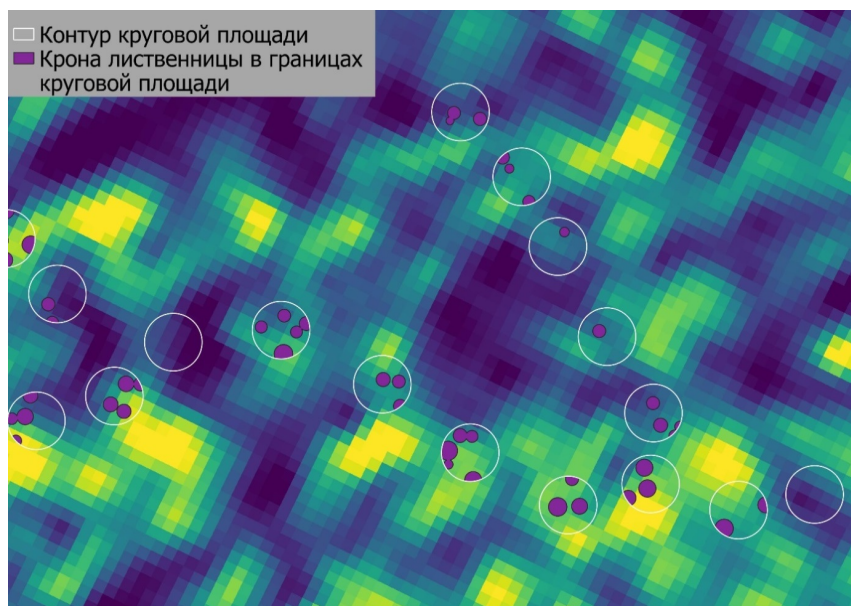


Рис 3. Фрагмент одноканального псевдоцветного изображения космического снимка Sentinel-2 (канал B4)

Fig. 3. Fragment of a single-channel pseudo-color image of the Sentinel-2 satellite image (band B4)

В табл. 2 приведены средние значения спектральной яркости и доля покрытия кроны лиственницы на каждой КППР.

Для лучшей интерпретации данных построен график разброса значений яркости КППР (рис. 4).

Таблица 2

Данные по зональной статистике КППР на космическом снимке Sentinel-2 в диапазоне (B04)

Data on the zonal statistics of the circular plot of constant radius (CPCR) on the Sentinel-2 satellite image in the band (B04)

Номер КППР	Значение средней яркости КППР	Доля покрытия крон лиственных на КППР, %	Номер КППР	Значение средней яркости КППР	Доля покрытия крон лиственных на КППР, %
1	14,7	6,8	37	14,1	7,5
2	18,4	25,8	38	14,4	0,0
3	15,9	23,0	39	15,4	3,9
4	17,8	22,9	40	15,1	10,8
5	14,3	0,0	41	17,2	20,0
6	14,5	16,8	42	14,7	0,0
7	13,2	0,0	43	17,0	12,9
8	15,4	8,8	44	17,4	26,4
9	18,1	23,6	45	14,2	17,0
10	16,1	10,0	46	16,5	5,0
11	18,4	13,6	47	16,4	4,1
12	14,4	12,0	48	16,4	4,1
13	17,5	21,9	49	13,3	9,6
14	13,4	0,0	50	13,5	0,0
15	15,5	5,3	51	17,1	7,0
16	14,2	15,6	52	15,7	5,2
17	16,7	15,1	53	16,8	27,3
18	17,3	13,3	54	15,9	22,0
19	15,0	4,5	55	14,3	2,7
20	17,0	9,5	56	17,5	15,7
21	16,7	14,0	57	14,2	0,9
22	15,0	13,3	58	16,7	9,4
23	16,0	11,3	59	15,3	0,0
24	13,4	0,0	60	14,6	2,8
25	18,2	15,0	61	15,1	3,5
26	13,4	0,0	62	17,0	22,8
27	18,1	15,0	63	13,7	1,1
28	16,1	9,5	64	18,2	10,1
29	16,4	13,2	65	14,1	0,0
30	13,6	0,0	66	14,8	9,7
31	15,0	12,0	67	16,2	8,1
32	15,9	9,9	68	18,4	19,3
33	13,4	4,2	69	16,1	14,1
34	15,9	18,5	70	14,0	8,9
35	15,2	1,2	71	17,1	15,1
36	16,3	8,0			

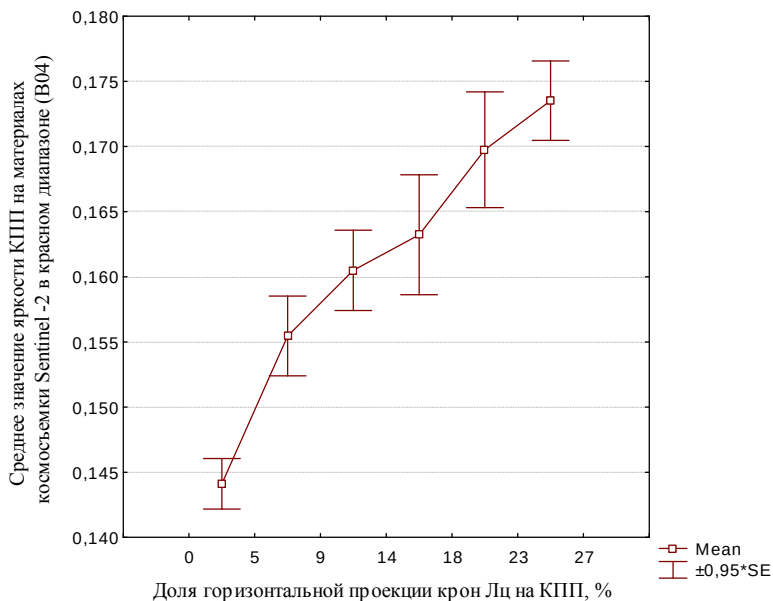


Рис. 4. Значения яркости КППР на материалах Sentinel-2 в зависимости от горизонтальной проекции крон лиственницы на КППР

Fig. 4. Brightness values of circular plots of constant radius (CPCR) on Sentinel-2 materials as a function of horizontal projection of larch crowns on the CPCR

На графике (рис. 4) прослеживается линейная зависимость средних значений яркости КППР от доли горизонтальной проекции крон лиственниц на КППР. Для оценки влияния доли горизонтальной проекции крон лиственницы на значение яркости КППР на материалах Sentinel-2 проведен однофакторный дисперсионный анализ, подтверждающий статистически значимую связь. Полученная величина ошибки $p = 0,000001$ опровергает нулевую гипотезу об отсутствии связи доли горизонтальной проекции крон лиственниц и спектральной яркости КППР. Поскольку $p < 0,05$, можно заключить, что значения яркости КППР на материалах космоснимка статистически значимо различаются в зависимости от доли горизонтальной проекции крон лиственницы на КППР.

Благодаря развитию современных технологий появилась возможность получения детальной съемки с БВС практически в оперативном режиме [Бабашкин и др., 2016]. Наличие аэрофотоснимков позволяет по-новому

подойти к вопросам сбора полевых материалов. Применение сверхдетальной съемки позволило провести картирование крон лиственницы с географической привязкой. Полученная цифровая основа использована для выявления особенностей отображения объекта исследования на космическом снимке.

Заключение. Материалы аэрофотосъемки, полученной в осенний период, позволяют выделять кроны лиственницы с высокой точностью. Для картографирования крон лиственниц использована цифровая съемка, выполненная с помощью БВС. Общая точность визуального выделения лиственницы на ортофотоплане по сравнению с полевым обследованием составила 90,7%. Для выявления особенностей отображения лиственницы на материалах космической съемки заложена 71 круговая площадка постоянного радиуса. Для изучения особенностей отображения КППР использована космическая съемка, выполненная космическим летательным аппаратом Sentinel-2. Однофакторный анализ показал достоверную связь спектральной яркости КППР с долей проекции крон лиственниц на КППР.

Вклад авторов. Богданов А.П. – 50%, Ильинцев А.С. – 50%.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алексеев А.С., Черниковский Д.М. Выявление ранних стадий повреждения еловых древостоев короедом-типографом на основе совмещенного анализа материалов спутниковой съемки Sentinel-2b и наземных обследований // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 246. С. 22–43. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.246.22-43.

Алешко Р.А., Шошина К.В., Березовский В.В., Васендина И.С., Воронцов Р.А., Десятова Т.О. Разработка методики определения объёмов лесоматериалов с использованием беспилотного воздушного судна // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 4. С. 111–120. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-111-120.

Бабашкин Н.М., Кадничанский С.А., Нехин С.С. Топографическая аэросъемка в России // Геоматика. 2016. № 1 (30). С. 30–36.

Берлина Н.Г., Зануздаева Н.В. Календарь природы Лапландского биосферного заповедника // Матер. Междунар. науч.-практич. конференции. УрГПУ, Екатеринбург, 2015. С. 88–100.

Богданов А.П., Третьяков С.В., Копейкин М.А. Разработка алгоритма дешифрования мультиспектральных спутниковых снимков среднего разрешения с

целью выделения древостоев лиственницы // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филиппова. 2023. № 3(72). С. 61–71. DOI: 10.34655/bgsha.2023.72.3.007.

Васина А.Л., Таланова Г.И. Анализ многолетних климатических и фенологических данных заповедника «Малая Сосьва» (Северное Зауралье): матер. Междунар. науч.-практич. конф. УрГПУ, Екатеринбург, 2015. С. 100–111.

Жарко В.О., Барталев С.А. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11, №. 3. С. 159–170.

Кищенко И.Т. Влияние климатических факторов на сезонное развитие хвойных лесообразующих видов в таежной зоне (Карелия) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 3. С. 72–82. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82.

Наквасина Е.Н., Барабин А.И., Тихонов П.Р., Елисеев А.А. Лиственница на Архангельском Севере: биология, изменчивость, сохранение: монография. Архангельск: Арханг. гос. техн. ун-т, 2008. 216 с.

Шошина К.В., Алешко Р.А., Березовский В.В., Васендина И.С., Шошин А.С., Гурьев А.Т. Тематическое дешифрирование аэроснимков лесных территорий на основе концептуального моделирования // Онтология проектирования. 2023. Т. 13, № 3(49). С. 437–454. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-437-454.

Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K. Forest Stand Species Mapping Using the Sentinel-2 Time Series // Remote Sens. 2019. Vol. 11, no. 10. Art. no. 1197. DOI: 10.3390/rs11101197.

Kollert A., Bremer M., Löw M., Rutzinger M. Exploring the Potential of Land Surface Phenology and Seasonal Cloud Free Composites of One Year of Sentinel-2 Imagery for Tree Species Mapping in a Mountainous Region // Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 2021. Vol. 94. Art. no. 102208. DOI: 10.1016/J.JAG.2020.102208.

Li X., Liu Z., Lin H., Wang G., Sun H., Long J., Zhang M. Estimating the Growing Stem Volume of Chinese Pine and Larch Plantations based on Fused Optical Data Using an Improved Variable Screening Method and Stacking Algorithm // Remote Sens. 2020. Vol. 12. Art. no. 871. DOI: 10.3390/rs12050871.

Monteiro A.T., Rosa S., Andreone F., Ndriantsoa S., Rakotonanahary T., Dawson J., Rabemananjara F.C.E., Rabibisoa N.H.C., Lucas R., Crottini A. Anthropogenic landscape change and amphibian diversity in tropical montane biodiversity hotspots: insights from satellite remote sensing in the Madagascar highlands // Environ. Dev. Sustain. 2023. Vol. 27. P. 7219–7242. DOI: 10.1007/s10668-023-04187-9.

Punalekar S.M., Planque C., Lucas R.M., Evans D., Correia V., Owers C.J., Poslajko P., Bunting P., Chognard S. National scale mapping of larch plantations for Wales using the Sentinel-2 data archive // Forest Ecology and Management. 2021. Vol. 501. Art. no. 119679. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119679.

Rees W.G., Tomaney J., Tutubalina O., Zharko V., Bartalev S. Estimation of Boreal Forest Growing Stock Volume in Russia from Sentinel-2 MSI and Land Cover Classification // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. Art. no. 4483. DOI: 10.3390/rs13214483.

Sentinel Hub. EO Browser. URL: <https://www.sentinel-hub.com> (дата обращения: 16.10.2023).

Shen Y., Zhang X., Wang W., Nemani R., Ye Y., Wang J. Fusing Geostationary Satellite Observations with Harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 Time Series for Monitoring Field-Scale Land Surface Phenology // *Remote Sens.* 2021. Vol. 13. Art. no. 4465. DOI: 10.3390/rs13214465.

Yu T., Pang Y., Liang X.J., Jia W., Bai Y., Fan Y.L., Chen D.S., Liu X.Z., Deng G., Li C.G., Sun X.N., Zhang Z.D., Jia W.W., Zhao Z.H., Wang X. China's larch stock volume estimation using Sentinel-2 and LiDAR data // *Geo-Spatial Inf. Sci.* 2023. Vol. 26, iss. 3. P. 392–405. DOI: 10.1080/10095020.2022.2105754.

References

Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M. Identification of early stages of damage to spruce stands by bark beetle-typographer based on combined analysis of Sentinel-2B satellite survey materials and ground surveys. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, no. 246, pp. 22–43. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.246.22-43. (In Russ.)

Aleshko R.A., Shoshina K.V., Berezovsky V.V., Vasendina I.S., Vorontsov R.A., Desyatova T.O. Development of a methodology to determine the volume of timber using an unmanned aerial vehicle. *Current problems in remote sensing of the earth from space*, 2023, vol. 20, no. 4, pp. 111–120. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-111-120. (In Russ.)

Babashkin N.M., Kadnichansky S.A., Nekhin S.S. Topographic aerial photography in Russia. *Geomatics*, 2016, no. 1 (30), pp. 30–36. (In Russ.)

Berlina N.G., Zanuzdayeva N.V. Nature calendar of the Lapland Biosphere Reserve. *Materials of the International Scientific and Practical Conference*, USPU, Yekaterinburg, 2015, pp. 88–100. (In Russ.)

Bogdanov A.P., Tretyakov S.V., Kopeikin M.A. Development of an algorithm for decrypting multispectral satellite images of medium resolution in order to isolate stands of larch. *Bulletin of the Buryat State Agricultural Academy named after V.R. Filippov*, 2023, no. 3(72), pp. 61–71. DOI: 10.34655/bgsha.2023.72.3.007. (In Russ.)

Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K. Forest Stand Species Mapping Using the Sentinel-2 Time Series. *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, no. 10, art. no. 1197. DOI: 10.3390/rs11101197.

Kishchenko I.T. The Effect of Climatic Factors on the Seasonal Development of Coniferous Forest-Forming Species in the Taiga Zone (Karelia). *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2020, no. 3, pp. 72–82. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-3-72-82 (In Russ.)

Kollert A., Bremer M., Löw M., Rutzinger M. Exploring the Potential of Land Surface Phenology and Seasonal Cloud Free Composites of One Year of Sentinel-2 Imagery for Tree Species Mapping in a Mountainous Region. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 2021, vol. 94, art. no. 102208. DOI: 10.1016/J.JAG.2020.102208.

Li X., Liu Z., Lin H., Wang G., Sun H., Long J., Zhang M. Estimating the Growing Stem Volume of Chinese Pine and Larch Plantations based on Fused Optical Data Using an Improved Variable Screening Method and Stacking Algorithm. *Remote Sens.*, 2020, vol. 12, art. no. 871. DOI: 10.3390/rs12050871.

Monteiro A.T., Rosa S., Andreone F., Ndriantsoa S., Rakotonanahary T., Dawson J., Rabemananjara F.C.E., Rabibisoa N.H.C., Lucas R., Crottini A. Anthropogenic landscape change and amphibian diversity in tropical montane biodiversity hotspots: insights from satellite remote sensing in the Madagascar highlands. *Environ. Dev. Sustain.*, 2023, vol. 27, pp. 7219–7242. DOI: 10.1007/s10668-023-04187-9.

Nakvasina E.N., Barabin A.I., Tikhonov P.R., Eliseev A.A. Larch in the Arkhangelsk North: biology, variability, conservation. Arkhangelsk: Arkh. STU, 2008. 216 p. (In Russ.)

Punalekar S.M., Planque C., Lucas R.M., Evans D., Correia V., Owers C.J., Poslajko P., Bunting P., Chognard S. National scale mapping of larch plantations for Wales using the Sentinel-2 data archive. *Forest Ecology and Management*, 2021, vol. 501, art. no. 119679. DOI: 10.1016/j.foreco.2021.119679.

Rees W.G., Tomaney J., Tutubalina O., Zharko V., Bartalev S. Estimation of Boreal Forest Growing Stock Volume in Russia from Sentinel-2 MSI and Land Cover Classification. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, art. no. 4483. DOI: 10.3390/rs13214483.

Sentinel Hub. EO Browser. URL: <https://www.sentinel-hub.com>. (accessed October 16, 2023).

Shen Y., Zhang X., Wang W., Nemani R., Ye Y., Wang J. Fusing Geostationary Satellite Observations with Harmonized Landsat-8 and Sentinel-2 Time Series for Monitoring Field-Scale Land Surface Phenology. *Remote Sens.*, 2021, vol. 13, art. no. 4465. DOI: 10.3390/rs13214465.

Shoshina K.V., Aleshko R.A., Berezovsky V.V., Vasendina I.S., Shoshin A.S., Guryev A.T. Thematic interpretation of aerial photographs of forest areas based on conceptual modeling. *Onthology of designing*, 2023, vol. 13, no. 3, pp. 437–454. DOI: 10.18287/2223-9537-2023-13-3-437-454. (In Russ.)

Vasina A.L., Talanova G.I. Analysis of long-term climatic and phenological data of the reserve «Malaya Sosva» (Northern Trans-Urals). *Materials of the International scientific and practical conference*, USPU, Yekaterinburg, 2015, pp. 100–111 (In Russ.)

Yu T., Pang Y., Liang X.J., Jia W., Bai Y., Fan Y.L., Chen D.S., Liu X.Z., Deng G., Li C.G., Sun X.N., Zhang Z.D., Jia W.W., Zhao Z.H., Wang X. China's larch stock volume estimation using Sentinel-2 and LiDAR data. *Geo-Spatial Inf. Sci.*, 2023, vol. 26, iss. 3, pp. 392–405. DOI: 10.1080/10095020.2022.2105754.

Zharko V.O., Bartalev S.A. Assessment of tree species recognition based on satellite data on seasonal changes in their spectral reflectance characteristics. Current problems in remote sensing of the earth from space, 2014, vol. 11, no. 3, pp. 159–170 (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 05.04.2024

Богданов А.П., Ильинцев А.С. Особенности спектрального отображения лиственницы в осенний период на материалах съемки Sentinel-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 253. С. 6–21. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.6-21

Исследование посвящено выявлению особенностей спектрального отображения древостоев с участием и преобладанием лиственницы в осенний период на материалах съемки Sentinel-2. Для изучения отображения древостоев с участием и преобладанием лиственницы использован диапазон съемки от 650,0 нм до 680,0 нм, соответствующий каналу B4 Sentinel-2. В качестве критерия выбора даты съемки использованы фенологические особенности лиственницы и сопутствующих лиственных пород на исследуемой территории. Для проведения полевых работ подобрана территория с участием и преобладанием лиственницы в 76 и 92 кварталах Кепинского участкового лесничества Архангельского лесничества. Для оценки древостоя выбран метод таксации круговыми площадками постоянного радиуса (КППР). Географическая привязка центров КППР осуществлялась с помощью GPS-навигатора Garmin 62. Для целей исследования заложена 71 КППР. Для картографирования крон лиственниц на КППР использовалась съемка в октябре 2022 г. с беспилотного воздушного судна. Для оценки точности аналитического выделения лиственницы по материалам детальной съемки использованы материалы полевого обследования. Фенологические особенности лиственницы позволяют выделить указанную породу на материалах детальной съемки с точностью свыше 90%. Выявлена линейная связь увеличения спектральной яркости КППР на космическом снимке Sentinel-2 с увеличением доли лиственницы. Проведенный комплекс работ, включающий полевые работы, определение на детальной съемке отдельных крон лиственницы и анализ их отображения на космоснимке, может применяться при решении задач по определению ареала распространения лиственницы в Архангельской области и на Европейском Севере. Результаты исследования будут способствовать развитию методов автоматизированного дешифрирования.

Ключевые слова: дешифрирование, лиственница, фенология, аэрокосмосъемка, Sentinel-2, беспилотный летательный аппарат.

Bogdanov A.P., Ilyintsev A.S. Features of the spectral display of larch in the autumn period on the materials of the Sentinel-2 survey. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2025, iss. 253, pp. 6–21 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.6-21

The study is devoted to revealing the peculiarities of spectral mapping of stands with participation and predominance of larch in the autumn period on the materials of Sentinel-2 imagery. The imaging range from 650.0 nm to 680.0 nm, corresponding to Sentinel-2 channel B4, was used to study the mapping of stands with larch participation and predominance. Phenological peculiarities of larch and associated hardwoods in the study area were used as a criterion for selecting the survey date. For field work, an area with larch participation and predominance was selected in the territory of 76 and 92 quarters of the Kepinsky district forestry of Arkhangelskoye lesnichestvo. For stand assessment, the method of constant radius circular plots (CRCP) was chosen. Geographical reference of the circular plots centers was carried out using a Garmin 62 GPS navigator. For the purposes of the study, 71 CRCPs were established. In October 2022 an unmanned aircraft survey was used to map larch crowns in the circular plots. Field survey materials were used to assess the accuracy of analytical larch identification based on detailed survey data. Phenological peculiarities of larch make it possible to identify this species on the detailed imagery materials with an accuracy of over 90%. A linear relationship between the increase in the spectral brightness of CRCP on the Sentinel-2 satellite image and the increase in the larch share was revealed. The complex of works carried out, including field work, the determination of individual larch crowns on a detailed survey and the analysis of their display on a satellite image, can be used to solve problems of determining the distribution area of larch in the Arkhangelsk region and the European North. The results of the study will contribute to the development of automated decryption methods.

Key words: interpretation, larch, phenology, aerial photography, Sentinel-2, unmanned aerial vehicle.

БОГДАНОВ Александр Петрович – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства; доцент кафедры лесоводства и лесоустройства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, кандидат сельскохозяйственных наук. Researcher ID: N-6286-2019. ORCID: 0000-0002-1655-7212. SPIN-код: 6726-0429.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru

BOGDANOV Alexandr P. – PhD (Agriculture), Senior Researcher, Northern Research Institute of Forestry; Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Researcher ID: N-6286-2019. ORCID: 0000-0002-1655-7212. SPIN-code: 6726-0429.

163062, Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: a.p.bogdanov@sevniilh-arh.ru

ИЛЬИНЦЕВ Алексей Сергеевич – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства; доцент кафедры лесоводства и лесоустройства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, кандидат сельскохозяйственных наук. Researcher ID: N-6286-2019. ORCID: 0000-0003-3524-4665. SPIN-код: 1299-7037. 163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: a.ilintsev@narfu.ru

ILYINTSEV Aleksey S. – PhD (Agriculture), Senior Researcher, Northern Research Institute of Forestry; Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. Researcher ID: N-6286-2019. ORCID: 0000-0003-3524-4665. SPIN-code: 1299-7037. 163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: a.ilintsev@narfu.ru