

Д.М. Черниковский

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ
СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ SENTINEL-2
ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРЕОБЛАДАЮЩИХ ДРЕВЕСНЫХ ПОРОД
ПРИ ТАКСАЦИИ ЛЕСОВ**

Введение. Дистанционные способы таксации лесов указаны наряду с другими (наземным, рационального сочетания и актуализации) в действующей Лесоустроительной инструкции¹. К дистанционным способам относятся аналитико-измерительное дешифрирование материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и автоматизированная обработка и анализ материалов ДЗЗ (ст. 209 и 211 Инструкции). Таксация лесов путем аналитико-измерительного дешифрирования с применением фотограмметрического программного обеспечения в последние годы активно применяется в лесоустроительном производстве государственными и частными компаниями. Стадии разработки, апробации и внедрения технологии аналитико-измерительного дешифрирования отражены в публикациях [Архипов и др., 2014а, б; Березин, Черниковский, 2019; Черниковский, 2020]. Методика работ опубликована [Архипов и др., 2021] и находится в открытом доступе².

К известным недостаткам таксации путем аналитико-измерительного дешифрирования относят низкий уровень автоматизации работ и субъективность определения таксационных характеристик. При аналитическом (визуальном) дешифрировании процесс обучения специалистов проходит через просмотр сотен снимков вместе с тесным изучением условий окружающей среды и наблюдаемых процессов. Успех в дешифрировании материалов ДЗЗ зависит от опыта и подготовки дешифровщика, природы дешифрируемых объектов или явлений и качества используемых снимков. Опытным дешифровщикам, как правило, присущи острая наблюдательность в сочетании с воображением и большим терпением [Lillesand et al., 2015].

Определение породного состава относится к ключевым задачам таксации лесов. Изучение признаков дешифрирования древесных пород и

¹ Лесоустроительная инструкция. Утверждена приказом Минприроды России от 5 августа 2022 года № 510.

² <https://lesproekt.org/?p=index>

насаждений на материалах съемки происходит в процессе полевой и камеральной тренировки. Для организации тренировки в пределах конкретного объекта лесосуточных работ закладывается таксационно-дешифровочный полигон [Архипов и др., 2021]. К итоговым результатам анализа признаков дешифрирования относятся сводные таблицы признаков с пошаговым определением достоверности дешифрирования. Алгоритм статистической обработки признаков дешифрирования [Данюлис и др., 1980] реализован в программном продукте Photomod StereoMeasure³ (рис. 1).

Одной из практических проблем, возникающих в процессе аналитико-измерительного дешифрирования, является трудность разделения близких по признакам дешифрирования древесных пород. Для условий Ленинградской области к таким породам могут относиться, например, береза и осина, береза и ольха черная. Сходство и различие древесных пород по признакам дешифрирования зависят от географического положения, параметров и времени проведения съемки, особенностей камеры и иных факторов.

Важной научно-практической задачей является поиск новых подходов, способствующих правильному определению древесных пород при дешифрировании. К возможным направлениям решения данной задачи относятся различные многочисленные алгоритмы автоматизированной классификации материалов ДЗЗ [Воробьев и др., 2015; Курбанов и др., 2018; Али и др., 2020; Тарасова, 2023; Дмитриев и др., 2024]. Перспективным направлением при изучении лесов по материалам ДЗЗ является использование вегетационных индексов [Пушкин и др., 2020]. Вегетационные индексы широко используются для оценки повреждения лесов насекомыми [Крылов и др., 2011; Рахматулина и др., 2021; Сулытсон и др., 2023; Abdullah, 2019; Abdullah et al. 2019a, b; Alekseev, Chernikhovskii, 2021, 2022; Georgiev et al., 2022] и пожарами [Стыценко и др., 2019], проведения гидромелиоративных исследований [Пахучий, Пахучая, 2014; Пахучий, Шевелев, 2016], классификации растительного покрова [Али и др., 2020], оценки состояния лесных культур [Копытков, Гусев, 2023], оценки зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами [Мартынова и др., 2020] и иных задач при изучении лесов, сельскохозяйственных угодий, мониторинге, картографировании [Пушкин и др., 2020; Гусев, 2021]. На сезонную и многолетнюю изменчивость вегетационных индексов лесных насаждений может влиять содержание хлорофиллов в хвое [Силкина, Винокурова, 2009], различия в стадиях лесообразования, возрасте, типе леса, составе, группе [Жиринов и др., 2014, 2016]. Разные вегетационные индексы обладают различной сезонной изменчивостью.

³ <https://racurs.ru/program-products/photomod-stereomeasure/>

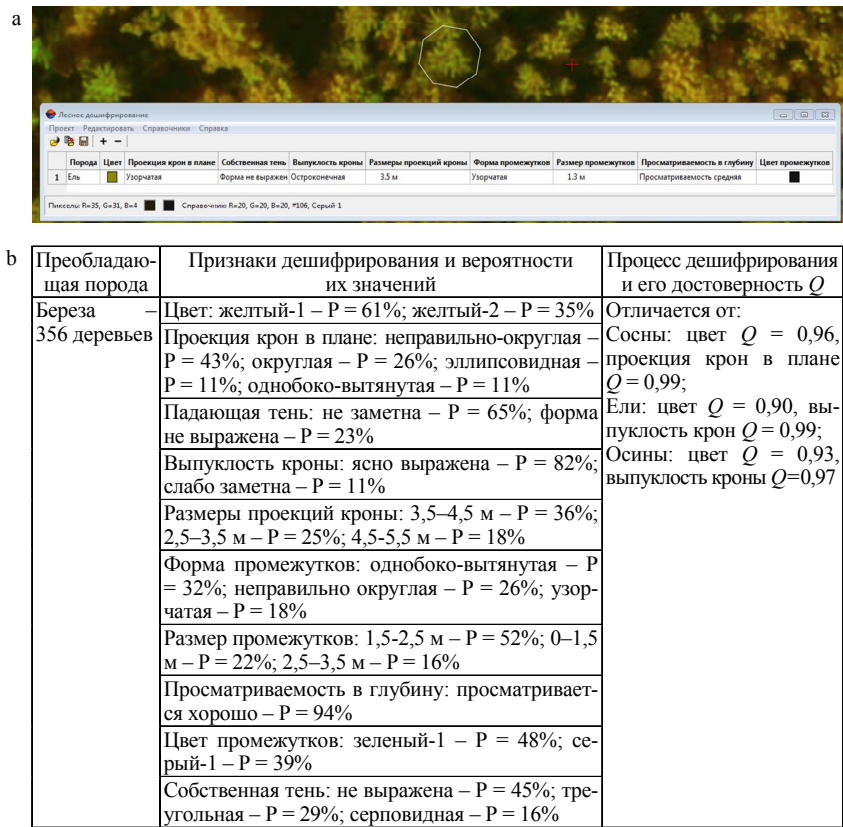


Рис. 1. Этапы анализа признаков дешифрирования в программе Photomod StereoMeasure: а – процесс заполнения таблицы признаков дешифрирования отдельных деревьев; б – фрагмент итоговой таблицы признаков дешифрирования с определением достоверности дешифрирования

Fig. 1. Stages of the analysis of decryption signs in the Photomod StereoMeasure program: a – the process of filling in the table of decryption signs of individual trees; б – a fragment of the final table of decryption signs with the determination of the reliability of decryption

Цель исследования заключалась в оценке целесообразности применения многозональных космических снимков в качестве дополнительных материалов для определения древесных пород при аналитико-измерительном дешифрировании. Задачи исследования состояли в выборе лесотаксационных выделов с преобладанием основных лесобразующих пород для модельной территории, получении материалов многозональной космической

съемки, оценке спектральных характеристик выбранных участков и статистическом анализе результатов.

Материалы и методика исследования. В качестве модельной территории выбрана Лисинская часть Учебно-опытного лесничества (бывший Лисинский учебно-опытный лесхоз), расположенная в Тосненском муниципальном районе Ленинградской области. Это компактный лесной массив с длительной лесокультурной и научной историей, который представляет собой типичный образец интенсивного лесного хозяйства данного лесного района⁴. Последнее лесоустройство лесничества было проведено в 2021 г. Территория относится к Балтийско-Белозерскому таежному району Российской Федерации. Все леса относятся к защитным, представленным преимущественно ценными лесами, имеющими научное или историческое значение. Средний состав насаждений по данным ГЛР на 01.01.2023 3Е2С3Б2Ос, средний возраст 88 лет, средний класс бонитета 2,3, средняя полнота 0,65⁵.

Методика работ включала выбор лесотаксационных выделов с преобладанием основных лесообразующих пород из геоинформационных баз данных лесоустройства, получение материалов многозональной космической съемки Sentinel-2 за отдельные месяцы вегетационного периода 2021 г., определение спектральных характеристик и вегетационных индексов выбранных участков и статистический анализ.

На основе анализа литературы [Черепанов, Дружинина, 2009; Черепанов, 2011; Пахучий, Шевелев, 2016; Стыщенко и др., 2019; Мартынова и др., 2020; Пушкин и др., 2020; Рахматуллина и др., 2021; Использование..., 2024] выбран набор вегетационных индексов, потенциально полезных для определения породного состава.

Для оценки возможностей разделения участков с преобладанием различных древесных пород на основе материалов космической съемки использовался однофакторный дисперсионный анализ. Средствами дисперсионного анализа проводилось сопоставление изменчивости характеристик космических снимков для участков с различными древесными породами (графики средних значений), выполнялись количественная оценка изменчивости и группировка анализируемых участков (множественный ранговый тест).

На основе геоинформационных баз данных лесоустройства были сделаны выборки лесотаксационных выделов насаждений основных лесообразующих пород – березы, осины, ольхи серой и ольхи чёрной, расположенных на территории трех участков лесничеств Лисинской части Учебно-

⁴ Лесохозяйственный регламент Учебно-опытного лесничества Ленинградской области. СПб., 2023. 349 с.

⁵ Лесной план Ленинградской области. СПб., 2023. 333 с.

опытного лесничества. Критериями выбора служили возраст (80 лет и выше для хвойных, 60 лет и выше для березы, осины и ольхи черной, 40 лет и выше для ольхи серой), коэффициент преобладающей породы (8 и более единиц для сосны, ели, березы и осины; 7 и более единиц для ольхи черной и серой), класс бонитета (3-й и выше), относительная полнота (0,6 и выше). Обобщенные характеристики выбранных выделов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Краткие характеристики лесотаксационных выделов основных
лесообразующих пород, выбранных в качестве тренировочных участков**

**Brief characteristics of forest inventory plots
of the main forest-forming species selected as training sites**

Преобладающая порода	Количество выделов, шт.	Средний возраст, лет	Средний коэффициент преобладающей породы	Средний класс бонитета	Средняя относительная полнота	Средняя площадь, га
Сосна	124	121,3	10,0	2,6	0,69	2,99
Ель	49	93,5	8,5	1,8	0,70	1,73
Береза	110	76,5	8,5	2,1	0,68	2,38
Осина	81	90,4	8,6	1,0	0,71	1,96
Ольха серая	10	45,5	7,3	2,6	0,66	1,9
Ольха черная	10	70,5	7,2	2,1	0,72	2,3

Выбранные выделы расположены на территории трех участковых лесничеств Лисинской части Учебно-опытного лесничества. Перечисленные критерии предполагают выбор спелых и перестойных сомкнутых насаждений высоких классов бонитета, преимущественно чистых по составу.

С помощью картографического сервиса EO Browser⁶ на основе сформированных выборок были получены материалы безоблачной космической съемки Sentinel-2 с уровнем обработки Level 2A, прошедшие атмосферную коррекцию. Были выбраны следующие даты съемки: 18 апреля, 11 мая, 17 июня и 12 июля 2021 г. Полученные данные ДЗЗ в виде набора растровых слоев экспортировались в ГИС QGIS и далее использовались для определения средних значений спектральных яркостей отдельных каналов (B2, B3, B4, B8, B8A, B11 и B12) и расчета вегетационных индексов (SR, NDVI, EVI, ARVI, SWVI, NDMI). Краткая характеристика и формулы для расчета вегетационных индексов приведены в табл. 2.

⁶ <https://www.sentinel-hub.com/>

Таблица 2

Вегетационные индексы, рассчитываемые на основе данных Sentinel-2**Vegetation indices calculated based on Sentinel-2 data**

Формула	Назначение индекса
Относительный вегетационный индекс SR (Simple Ratio): $SR = \frac{B08}{B04}$	Характеризует состояние растительности, количество зеленой фитомассы, сомкнутость
Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized differential vegetation index): $NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$	Характеризует количество фитомассы
Усовершенствованный вегетационный индекс EVI (Enhanced Vegetation Index): $EVI = 2,5 \cdot \frac{B08 - B4}{B8 + 6B4 - 7,5B2 + 1}$	Является модификацией NDVI, позволяющей уменьшить влияние атмосферы и почвенного фона. Характеризует количество фитомассы и состояние растительности. Применяется при обилии растительной биомассы, наличии плотного полога растительности с высоким индексом листовой поверхности
Атмосферно устойчивый вегетационный индекс ARVI (Atmospherically Resistant Vegetation Index): $ARVI = \left(B08 - \frac{2B04 - B02}{B08} \right) + (2B04 - B02)$	Является модификацией NDVI, учитывающей влияние атмосферы. Применяется при определении границ и классификации растительного покрова
Коротковолновый вегетационный индекс SWVI (Short wave vegetation index) и нормализованный разностный индекс влажности NDMI (Normalized differential moisture index): $SWVI = \frac{B08 - B11}{B8 + B11}$ $NDMI = \frac{B08A - B11}{B08A + B11}$	Характеризуют относительное содержание влаги и хлорофилла в фитомассе растений. Используются для количественной оценки усыхания и повреждения растительности вследствие воздействия на неё деструктивных факторов

Для статистической обработки данных использовались программы MS Excel и Statgraphics.

Результаты исследования. Графики изменений средних значений спектральных яркостей и вегетационных индексов насаждений основных древесных пород в течение апреля-июля 2021 г. показаны на рис. 2 и 3.

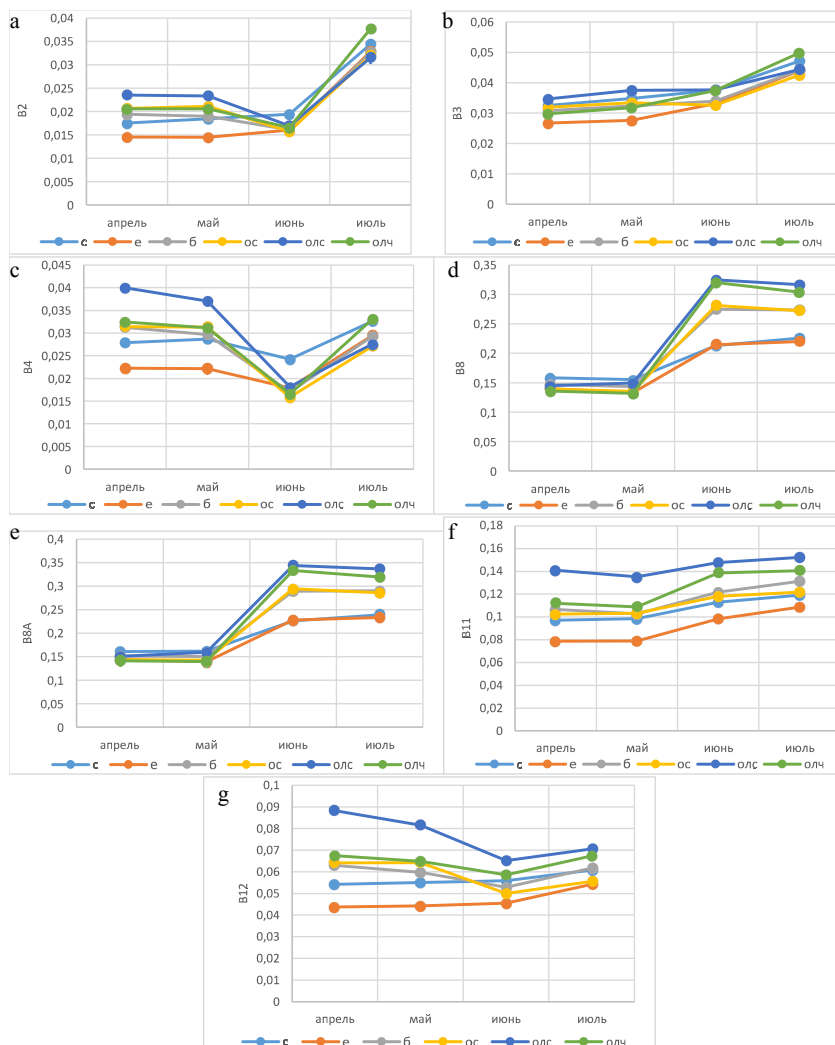


Рис. 2. Средние значения спектральной яркости каналов Sentinel-2 для основных лесообразующих пород за отдельные месяцы 2021 г.: а – B2; б – B3; в – B4; г – B8; д – B8A; е – B11; ж – B12

Fig. 2. Average values of spectral brightness of Sentinel-2 channels for the main forest-forming species for individual months of 2021: а – B2; б – B3; в – B4; г – B8; д – B8A; е – B11; ж – B12

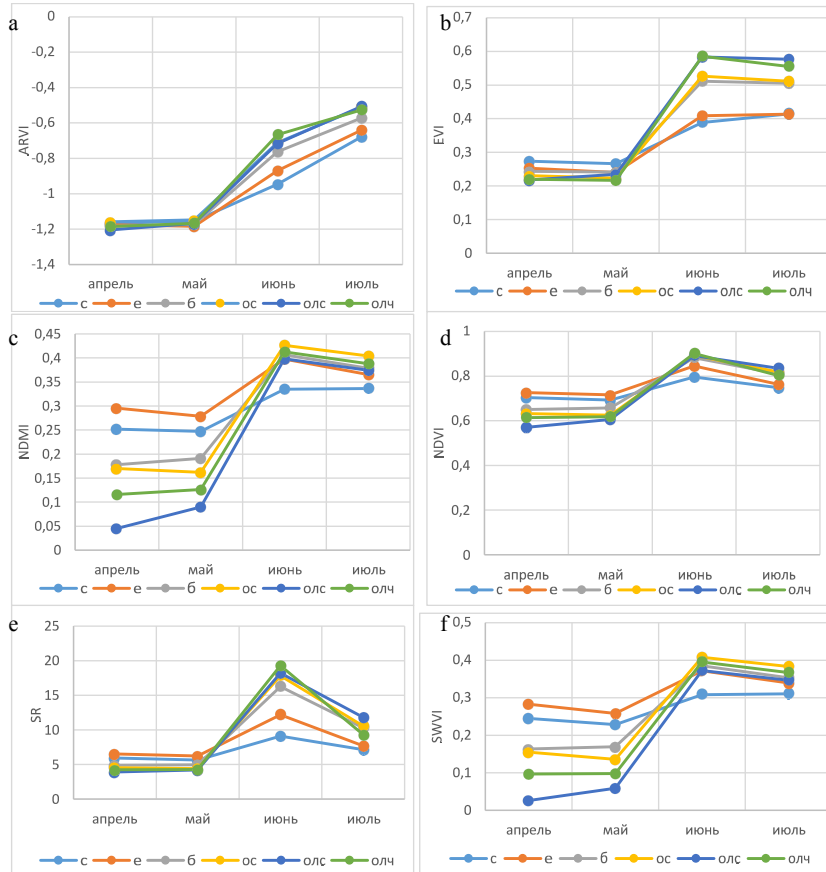


Рис. 3. Средние значения индексов, рассчитанных на основе Sentinel-2 для основных лесообразующих пород за отдельные месяцы 2021 г.: а – ARVI; б – EVI; в – NDMI; г – NDVI; д – SR; е – SWVI

Fig. 3. Average values of the indices calculated on the basis of Sentinel-2 for the main forest-forming species for individual months of 2021: а – ARVI; б – EVI; в – NDMI; г – NDVI; д – SR; е – SWVI

Изменения средних значений яркостей и вегетационных индексов насаждений преобладающих пород по времени неоднородны. Закономерна сезонная динамика индексов и связанных с ними спектральных каналов. Сезонная динамика индексов и спектральных яркостей лесных насаждений рассматривается в публикациях [Жири́н и др., 2014, 2016; Пушкин и др.,

2020]. На многих графиках видны существенные различия между характеристиками материалов ДЗЗ для разных пород в отдельные месяцы.

Для оценки возможностей определения отдельных древесных пород был выполнен дисперсионный анализ, где в качестве зависимой переменной рассматривались характеристики материалов ДЗЗ (средние значения спектральной яркости отдельных каналов, средние значения индексов), в качестве фактора – преобладающая древесная порода. Пример результатов дисперсионного анализа показан на рис. 4 и в табл. 3, 4.

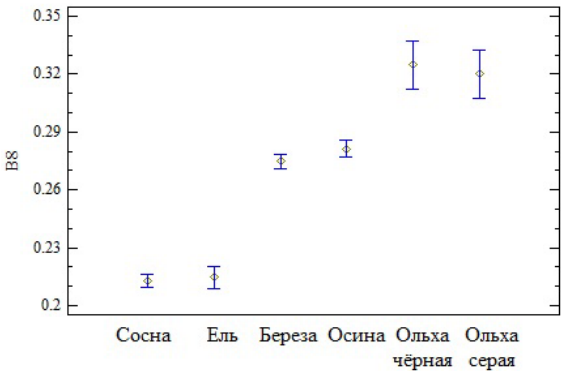


Рис. 4. Результаты дисперсионного анализа изменения спектральной яркости канала B8 спутника Sentinel-2 в июне в зависимости от преобладающей древесной породы: средние значения и их 95%-е доверительные интервалы

Fig. 4. Results of the analysis of variance of changes in the spectral brightness of the Sentinel-2 satellite channel B8 in June, depending on the predominant tree species: average values and 95% confidence intervals

Таблица 3

Результаты однофакторного дисперсионного анализа изменения спектральной яркости канала B8 по преобладающим древесным породам в июне

Results of one-factor variance analysis of changes in B8 channel spectral brightness based on predominant tree species in June

Источник изменчивости	Сумма квадратов отклонений	Число степеней свободы	Средний квадрат	F-критерий Фишера	Вероятность ошибки
Между группами	0,4816	5	0,0963	119,54	0,0000
Внутри групп	0,3030	376	0,0008		
Всего	0,7846	381			

Таблица 4

Результаты множественного рангового теста изменения спектральной яркости канала В8 по преобладающим древесным породам в июне (метод Фишера с наименьшей значимой разницей между средними)

Results of multiple range test of changes in B8 channel spectral brightness based on predominant tree species in June (Fisher's least significant difference method)

Идентификатор породы	Название преобладающей породы	Количество участков	Среднее	Однородные группы
1	Сосна	124	0,2130	X
2	Ель	49	0,2146	X
3	Береза	108	0,2748	X
4	Осина	81	0,2813	X
5	Ольха чёрная	10	0,3200	X
6	Ольха серая	10	0,3247	X

Попарное сравнение	Значимость	Разница средних значений	Доверительные интервалы, +/-
1 – 2		–0,0016	0,0094
1 – 3	*	–0,0618	0,0073
1 – 4	*	–0,0683	0,0080
1 – 5	*	–0,1117	0,0183
1 – 6	*	–0,1070	0,0183
2 – 3	*	–0,0602	0,0096
2 – 4	*	–0,0667	0,0101
2 – 5	*	–0,1101	0,0194
2 – 6	*	–0,1054	0,0194
3 – 4		–0,0065	0,0082
3 – 5	*	–0,0499	0,0184
3 – 6	*	–0,0452	0,0184
4 – 5	*	–0,0434	0,0187
4 – 6	*	–0,0387	0,0187
5 – 6		0,0047	0,0250

Примечание: * обозначает статистически значимую разницу между значениями спектральной яркости древесных пород в паре на 95%-м уровне доверительных интервалов

Обобщенные результаты дисперсионного анализа спектральных яркостей отдельных каналов и вегетационных индексов приведены в табл. 5. В табл. 6 отмечены древесные породы, для которых характеристики материалов ДЗЗ в определенные месяцы значимо отличаются.

Таблица 5

Результаты дисперсионного анализа (критерий Фишера и его значимость) изменчивости спектральных яркостей и вегетационных индексов материалов космической съемки Sentinel-2 в зависимости от преобладающих древесных пород

Results of the dispersion analysis (Fisher criterion and its significance) of the variability of spectral brightness and vegetation indices of Sentinel-2 space imagery materials depending on the predominant tree species

Месяц	Спектральная яркость						
	B2	B3	B4	B8	B8A	B11	B12
Апрель	29,39 (0,00)	19,34 (0,00)	21,6 (0,00)	54,37 (0,00)	44,13 (0,00)	31,16 (0,00)	33,21 (0,00)
Май	26,90 (0,00)	21,66 (0,00)	17,65 (0,00)	53,5 (0,00)	46,07 (0,00)	29,58 (0,00)	32,59 (0,00)
Июнь	44,89 (0,00)	25,71 (0,00)	82,57 (0,00)	119,54 (0,00)	119,51 (0,00)	39,12 (0,00)	26,6 (0,00)
Июль	0,79 (0,5577)	1,85 (0,1025)	2,26 (0,0482)	60,88 (0,00)	62,28 (0,00)	17,4 (0,00)	5,69 (0,00)
Месяц	Вегетационные индексы						
	ARVI	EVI	NDMI	NDVI	SR	SWVI	
Апрель	10,22 (0,00)	60,29 (0,00)	49,84 (0,00)	40,71 (0,00)	51,95 (0,00)	51,64 (0,00)	
Май	16,44 (0,00)	68,32 (0,00)	51,62 (0,00)	37,46 (0,00)	46,85 (0,00)	55,27 (0,00)	
Июнь	220,67 (0,00)	163,21 (0,00)	123,28 (0,00)	220,06 (0,00)	245,34 (0,00)	126,29 (0,00)	
Июль	70,12 (0,00)	79,60 (0,00)	50,33 (0,00)	32,69 (0,00)	49,77 (0,00)	51,77 (0,00)	

Таблица 6

Определение древесных пород на основе дисперсионного анализа значений спектральной яркости каналов Sentinel-2B

Determination of tree species based on dispersion analysis of spectral brightness values of Sentinel-2B channels

Месяц	Спектральная яркость						
	B2	B3	B4	B8	B8A	B11	B12
Апрель	С, Е, Олс (29,39)	Е (19,34)	С, Е, Олс (21,6)	С (54,37)	С (44,13)	С, Е, Олс (31,16)	С, Е, Олс (33,21)
Май	Е (26,90)	Е (21,66)	Е, Олс (17,65)	–	Б (46,07)	С, Е, Олс (29,58)	С, Е, Олс (32,59)
Июнь	С (44,89)	–	С (82,57)	С-Е, Б-ОС, Олс- Олч (119,54)	С-Е, Б-ОС, Олс- Олч (119,51)	С, Е (39,12)	Е, Ос, Б, Олс (26,6)
Июль	–	–	–	С-Е, Б-ОС, Олс- Олч (60,88)	С-Е, Б-ОС, Олс- Олч (62,28)	Е (17,40)	–
Месяц	Вегетационные индексы						
	ARVI	EVI	NDMI	NDVI	SR	SWVI	
Апрель	–	С, Е, Б (60,29)	С, Е, Олс, Олч (49,84)	С, Е, Б (40,71)	С, Е, Б (51,95)	С, Е, Олс, Олч (51,64)	
Май	–	С (68,32)	С, Е, Б (51,62)	С, Е, Б (37,46)	С, Е, Б (46,85)	С, Е, Б (55,27)	
Июнь	С, Е, Б (220,67)	С, Е, Б, Ос (163,21)	С (123,28)	С, Е (220,06)	С, Е, Б (245,34)	С (126,29)	
Июль	С, Е, Б (70,12)	С-Е, Б-ОС, Олс –Олч (79,60)	С (50,33)	Хвойные, листвен- ные (32,69)	–	С (51,77)	

Примечание: в ячейках таблицы указаны древесные породы, значительно отличающиеся от других средними значениями спектральной яркости или значениями вегетационных индексов. В скобках приведены значения критерия Фишера (F-value). Уровень значимости дисперсионного анализа (p-value) для всех указанных комбинаций менее 0,05

Результаты дисперсионного анализа дополняют графики спектральных яркостей и индексов, представленные на рис. 2 и 3, и указывают на различную значимость применения данных ДЗЗ за разные периоды для определения древесных пород. Так, например, использование для разделения древесных пород каналов B2, B3, B4, B12 в июле будет наименее продуктивным: значения яркостей всех пород будут близки. Аналогично значения индекса ARVI в апреле и мае будут близкими для всех пород. В отдельные месяцы по значениям яркостей и индексов могут значимо отличаться группы древесных пород. Например, по значениям индекса NDVI в июле отличаются хвойные и лиственные породы. По значениям яркостей каналов B8 и B8A в июле выделяются три группы древесных пород – хвойные (сосна и ель), береза и осина, а также ольха (серая и черная). Такие же группы выделяются на основе значений индекса EVI в июле. Индексы SWVI и NDMI, часто отождествляемые в литературе (отличаются использованием каналов B8 и B8A), дают практически идентичные результаты в отношении определения древесных пород.

Обзор литературы подтверждает трудность успешного разделения древесных пород по материалам одномоментной многозональной космической съемки. Для более надежного разделения пород рекомендуется использовать разновременную съёмку и разные характеристики материалов ДЗЗ [Тарасова, 2023].

Полученные результаты не предполагают проведения автоматической классификации породного состава на основе космических снимков в целях таксации лесов. Установленные различия характеристик материалов ДЗЗ между отдельными преобладающими породами могут использоваться в качестве дополнительного признака при аналитико-измерительном дешифрировании. В первую очередь такие различия могут помочь при дешифрировании трудноразличимых на материалах аэрофотосъемки древесных пород (например, березы и осины). Часть показанных в табл. 5 и 6 результатов не будет иметь при этом значительного практического смысла. Так, разделение на материалах аэрофотосъемки хвойных и лиственных насаждений выполняется, как правило, достаточно успешно на основе синтета «ложные цвета» и использования морфометрических признаков.

Представляет интерес дальнейшее развитие данного направления – оценка спектральных характеристик древесных пород, их варьирования и сезонной динамики для других территорий, других временных интервалов, разных режимов ведения лесного хозяйства, разных лесорастительных условий, разных групп возраста и т. д.

Заключение. Проведенное исследование представляет теоретический и практический интерес. Продемонстрирована динамика спектральных характеристик основных древесных пород в течение четырех первых месяцев вегетационного периода на территории Лисинской части Учебно-опытного лесничества. Отмечены значимые различия значений характеристик материалов ДЗЗ для основных лесообразующих пород в отдельные месяцы. Сведения о локальной динамике значений индексов и спектральных яркостей важны для ряда направлений, связанных с оценкой и мониторингом лесов на основе дистанционных методов. На практике выявленные различия характеристик материалов космической съемки Sentinel-2 для основных лесообразующих пород могут использоваться в качестве дополнительного признака при производственном дешифрировании (наряду с формой и размерами крон, просматриваемостью полога и пр.). Изложенный подход может быть усовершенствован и автоматизирован для производственного применения с использованием картографических сервисов и открытого программного обеспечения.

Исследование выполнено в контексте участия ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова» во Всероссийском инновационном проекте государственного значения (ВИП ГЗ) «Единая национальная система мониторинга климатически активных веществ».

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Али М.С., Воробьев О.Н., Курбанов Э.А. Алгоритм «дерево решений» для классификации лесов Сирийской Арабской Республики по снимку SENTINEL-2 // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2020. № 1(45). С. 5–30.

Архипов В.И., Басков В.И., Белов В.А., Березин В.И., Черниковский Д.М. Руководство по таксации лесов дешифровочным способом. СПб.: ООО «ЛЕСПРО-ЕКТ», 2021. 99 с.

Архипов В.И., Черниковский Д.М., Березин В.И. Опыт таксации лесов дешифровочным способом на основе современного программно-аппаратного обеспечения и цифровых аэроснимков нового поколения // Сибирский лесной журнал. 2014а. № 5. С. 29–37.

Архипов В.И., Черниковский Д.М., Березин В.И., Белов В.А. Современная технология таксации лесов дешифровочным способом «От съемки – к проекту» // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014б. Вып. 208. С. 22–42.

Березин В.И., Черниковский Д.М. Современное развитие методологии лесного стереоскопического дешифрирования средствами фотограмметрического программного обеспечения (теория и практика) // Проблемы инвентаризации лесов и лесоустройства: матер. 5-й Междунар. научно-практич. конф. М.: Рослесинфорг, 2019. С. 112–117.

Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Губаев А.В., Демешева Е.Н. Методика пошаговой классификации спутниковых снимков для тематического картирования лесов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2015. № 4(28). С. 57–72.

Гусев А.П. Многолетние изменения вегетационных индексов как индикатор динамики состояния природных и антропогенных геосистем // Геополитика и экогеодинамика регионов. 2021. Т. 7 (17), вып. 2. С. 202–209.

Данюлис Е.П., Осипенко Г.С., Резник М.Х., Березин В.И. Вероятностный анализ признаков дешифрирования // Экономико-математическое моделирование лесохозяйственных мероприятий: сб. научных трудов. Л.: ЛенНИИЛХ, 1980. С. 153–160.

Дмитриев Е.В., Кондранин Т.В., Мельник П.Г., Донской С.А. Определение видового состава смешанного леса на основе совместной обработки публичных спутниковых карт и многовременных изображений Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 1. С. 31–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлиной С.П. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat // Лесоведение. 2014. № 5. С. 3–12.

Жиринов В.М., Князева С.В., Эйдлиной С.П. Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14.

Использование вегетационных индексов для анализа растительности. URL: https://gisproxima.ru/ ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov?ysclid=lxavkdtdj933222750 (дата обращения: 12.06.2024).

Копытков В.В., Гусев А.П. Исследования состояния лесных культур и биологической устойчивости насаждений в зоне первоочередного отселения с использованием многозональной космической съемки // Вестник Мозырского государственного педагогического университета им. И.П. Шамякина. 2023. № 1(61). С. 22–28.

Крылов А.М., Соболев А.А., Владимиров Н.А. Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. 2011. № 4. С. 54–60.

Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Меньшиков С.А., Смирнова Л.Н. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области

по данным спутника Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 5. С. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166

Мартынова М.В., Султанова Р.Р., Габделхаков А.К., Рахматуллин З.З., Одинцов Г.Е. Оценка зарастания сельскохозяйственных земель древесными породами по спутниковым данным Landsat на примере участка Бакалинского района Республики Башкортостан // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2020. № 6. С. 128–134.

Пахучий В.В., Пахучая Л.М. Опыт использования вегетационных индексов при комплексных исследованиях на объектах гидролесомелиорации // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2014. № 1(21). С. 33–41.

Пахучий В.В., Шевелев Д.А. Использование лесоустроительных материалов и спутниковых технологий при гидролесомелиоративных исследованиях // Успехи современного естествознания. 2016. № 5. С. 69–73.

Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Оценка возможностей использования спектрального вегетационного индекса EVI для дешифрирования лесных насаждений по материалам космической съемки // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 1(228). С. 5–11.

Рахматуллина И.Р., Рахматуллин З.З., Тагирова О.В., Хамидуллина Г.Г., Кулагин А.Ю. Использование вегетационных индексов для оценки характеристик сосновых насаждений г. Уфы и ее пригородов // Вестник Оренбургского государственного педагогического университета. Электронный научный журнал. 2021. № 3(39). С. 35–48. DOI: 10.32516/2303-9922.2021.39.3

Силкина О.В., Винокурова Р.И. Сезонная динамика содержания хлорофиллов и микроэлементов в формирующейся хвое *Abies sibirica* и *Picea abies* // Физиология растений. 2009. Т. 56, № 6. С. 864–870.

Стыценко Ф.В., Барталев С.А., Букась А.В., Ершов Д.В., Сайгин И.А. Возможности пролонгированной оценки постпожарного состояния хвойных вечнозелёных лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227

Сультсон С.М., Пономарев Е.И., Швецов Е.Г., Третьяков П.Д., Горошко А.А., Кулакова Н.Н., Михайлов П.В. Применение дистанционного зондирования для прогноза нарушений темнохвойных лесов после вспышки численности сибирского шелкопряда // Биосфера. 2023. Т. 15, № 1. С. 21–32.

Тарасова Л.В. Дистанционный мониторинг и спектральная разделимость классов лесного покрова водоохраных зон рек (на примере Марийского лесного

Заволжья): дис. ... канд. с.-х. наук. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2023. 179 с.

Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98–102.

Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. № 3. С. 28–32.

Черниковский Д.М. Теория и методы инвентаризации лесов на основе данных дистанционного зондирования Земли, цифрового моделирования рельефа и ГИС-технологий: дис. ... д-ра с.-х. наук. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. 386 с.

Abdullah H.J. Remote sensing of European spruce (*Ips typographus* L.) bark beetle green attack: PhD thesis. University of Twente, 2019. 151 p. DOI: 10.3990/1.9789036547956

Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Heurich M. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestation // Remote Sensing. 2019a. Vol. 11, iss. 4. Art. no. 398.

Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R., Heurich M. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8 // Remote Sensing in Ecology and Conservation. 2019b. Vol. 5, iss. 1. P. 87–106.

Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the health status of tree stands based on Sentinel – 2B remote sensing materials and the short-wave vegetation index SWVI // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 876. Art. no. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012003

Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M. Assessment of the State of Forests Based on Joint Statistical Processing of Sentinel-2B Remote Sensing Data and the Data from Network of Ground-Based ICP-Forests Sample Plots // Open Journal of Ecology. 2022. Vol. 12. P. 513–528. DOI: 10.4236/oje.2022.128028

Georgiev G., Georgieva M., Belilov S., Mirchev P., Deliyanchev S., Mladenov V., Kropov K., Haydarova S. Early Detection of *Ips Typographus* Infestations by Using Sentinel-2 Satellite Images In Windthrow Affected Norway Spruce Forests In Smolyan Region, Bulgaria // Silva Balcanica. 2022. Vol. 23, iss. 2. P. 27–34. DOI: 10.3897/silvabalcanica.22.e98314

Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. Seventh Edition. New York, Wiley, 2015. 736 p.

References

Abdullah H.J. Remote sensing of European spruce (*Ips typographus*, L.) bark beetle green attack: PhD Thesis. University of Twente, 2019. 151 p. DOI: 10.3990/1.9789036547956

Abdullah H., Darvishzadeh R., Skidmore A.K., Heurich M. Sensitivity of Landsat-8 OLI and TIRS Data to Foliar Properties of Early Stage Bark Beetle (*Ips typographus* L.) Infestation. *Remote Sensing*, 2019a, vol. 11, iss. 4, art. no. 398. DOI: 10.3390/rs11040398

Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R., Heurich M. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2019b, vol. 5, iss. 1, pp. 87–106. DOI: 10.1002/rse2.93

Alekseev A., Chernikhovskii D. Assessment of the health status of tree stands based on Sentinel – 2B remote sensing materials and the short-wave vegetation index SWVI. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021, vol. 876, art. no. 012003. DOI: 10.1088/1755-1315/876/1/012003

Alekseev A.S., Chernikhovskii D.M. Assessment of the State of Forests Based on Joint Statistical Processing of Sentinel-2B Remote Sensing Data and the Data from Network of Ground-Based ICP-Forests Sample Plots. *Open Journal of Ecology*, 2022, vol. 12, pp. 513–528. DOI:10.4236/oje.2022.128028

Ali M.S., Vorobev O.N., Kurbanov E.A. Decision Tree Algorithm for Forest Classification of Syrian Arab Republic with the Use of Sentinel-2 Image. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 2020, no. 1 (45), pp. 5–30. DOI: 10.25686/2306-2827.2020.1.5 (In Russ.)

Arkhipov V.I., Baskov V.I., Belov V.A., Berezin V.I., Chernikhovskii D.M. Manual on forest taxation by decryption method. St. Petersburg: LESPROEKT LLC, 2021. 99 p. (In Russ.)

Arkhipov V.I., Chernikhovskii D.M., Berezin V.I. An Experience of Forest Inventory by Photo Interpretation Method Based on Advanced Firmware and Digital Aerial Photographs of New Generation. *Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science)*, 2014a, no. 5, pp. 29–37. (In Russ.)

Arkhipov V.I., Chernikhovskii D.M., Berezin V.I., Belov V.A. Modern technology of forest mensuration by interpretation method «From survey – to the project». *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2014b, iss. 208, pp. 22–42. (In Russ.)

Berezin V.I., Chernikhovskii D.M. Modern development of the methodology of forest stereoscopic decryption by means of photogrammetric software (theory and practice). *Problems of forest inventory and forest management: Proceedings of 5th International Scientific and Practical Conference*. M: Roslesinform, 2019, pp. 112–117. (In Russ.)

Cherepanov A.S. Vegetation indices. *Geomatics*, 2011, no. 2, pp. 98–102. (In Russ.)

Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spectral properties of vegetation and vegetation indices. *Geomatics*, 2009, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.)

Chernikhovskii D.M. Theory and methods of forest inventory based on data from remote sensing of the Earth, digital terrain modeling and GIS technologies: Dis. ... Doctor of Agricultural Sciences. St. Petersburg: St. Petersburg State Forest Technical University, 2020. 386 p. (In Russ.)

Danyulis E.P., Osipenko G.S., Reznik M.H., Berezin V.I. Probabilistic analysis of decryption signs. *Economic and mathematical modeling of forestry measures: Collection of scientific papers*. L.: LenNILH, 1980, pp. 153–160. (In Russ.)

Dmitriev E.V., Kondranin T.V., Melnik P.G., Donskoi S.A. Determining mixed forest species composition based on joint processing of public satellite maps and multi-temporal Sentinel-2 images. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current problems in remote sensing of the Earth from space)*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 31–50. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-31-50 (In Russ.)

Georgiev G., Georgieva M., Belilov S., Mirchev P., Deliyanchev S., Mladenov V., Kropov K., Haydarova S. Early Detection of *Ips Typographus* Infestations by Using Sentinel-2 Satellite Images In Windthrow Affected Norway Spruce Forests In Smolyan Region, Bulgaria. *Silva Balcanica*, 2022, vol. 23, iss. 2, pp. 27–34. DOI: 10.3897/silvabalkanica.22.e98314

Gusev A.P. Long-term changes in vegetation indices as an indicator of the dynamics of the state of natural and anthropogenic geosystems. *Geopolitics and ecogeodynamics of regions*, 2021, vol. 7 (17), iss. 2, pp. 202–209. (In Russ.)

Kopytkov V.V., Gusev A.P. Investigations of the state of forest crops and biological stability of plants in the zone of priority resettlement using multi-zone space image. *Bulletin of the I.P. Shamyakin Mozyr State Pedagogical University*, 2023, no. 1(61), pp. 22–28. (In Russ.)

Krylov A.M., Sobolev A.A., Vladimirova N.A. Revealing of Centers *Ips typographus* in Moscow Region with Use of Pictures Landsat. *Lesnoy vestnik (Forestry Bulletin)*, 2011, no. 4, pp. 54–60. (In Russ.).

Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., Menshikov S.A., Smirnova L.N. Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (Current problems in remote sensing of the Earth from space)*, 2018, vol. 15, no. 5, pp. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166. (In Russ.)

Lillesand T.M., Kiefer R.W., Chipman J.W. Remote Sensing and Image Interpretation. Seventh Edition. New York, Wiley, 2015. 736 p.

Martynova M.V., Sultanova R.R., Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z., Odintsov G.E. Assessment of reforestation on abandoned agricultural lands using Landsat data on the example of a site in the Bakalinsky Region of the Republic Bashkortostan. *Forest ecosystems in the context of climate change: biological productivity and remote monitoring*, 2020, no. 6, pp. 128–134. (In Russ.)

Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M. Experience of vegetation indices use for complex researches on the objects of hydro and forest amelioration. *Vestnik of Volga State University of Technology Series «Forest. Ecology. Nature Management»*, 2014, no. 1(21), pp. 33–41. (In Russ.)

Pakhuchiy V.V., Shevelev D.A. Use of forest management materials and satellite technologies at the forest drainage researches. *Advances in current natural sciences*, 2016, no. 5, pp. 69–73. (In Russ.)

Pushkin A.A., Sidelnik N.Ya., Kovalevskiy S.V. Estimation of possibilities of using the EVI spectral vegetation index for deciphering forest stands by satellite imagery. *Trudy BGTU [Proceedings of BSTU]*, 2020, no. 1 (228): Forestry, environmental management and processing of renewable resources, pp. 5–11. (In Russ.)

Rakhmatullina I.R., Rakhmatullin Z.Z., Tagirova O.V., Khamidullina G.G., Kulagin A.Yu. Using vegetation indices to assess the characteristics of pine plantations in Ufa and its suburbs. *Vestnik of Orenburg State Pedagogical University. Electronic Scientific Journal*, 2021, no. 3(39), pp. 35–48. DOI: 10.32516/2303-9922.2021.39.3 (In Russ.)

Silkina O.V., Vinokurova R.I. Seasonal dynamics of the content of chlorophylls and trace elements in the emerging conifers *Abies sibirica* and *Picea abies*. *Plant Physiology*, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 864–870. (In Russ.)

Stytsenko F.V., Bartalev S.A., Bukas A.V., Ershov D.V., Saigin I.A. The possibilities of a prolonged assessment of the post-fire state of coniferous evergreen forests according to multispectral satellite measurements. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 217–227. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-217-227 (In Russ.)

Sultson S.M., Ponomarev E.I., Shvetsov E.G., Tretyakov P.D., Goroshko A.A., Kulakova N.N., Mikhailov P.V. The use of remote sensing for forecasting violations of dark coniferous forests after the outbreak of the Siberian silkworm population. *Biosphere*, 2023, vol. 15, no. 1, pp. 21–32. DOI: 10.24855/biosfera.v15i1.790 (In Russ.)

Tarasova L.V. Remote monitoring and spectral separability of classes of forest cover of water protection zones of rivers (on the example of the Mari forest Volga region): Dis. ... Candidate of Agricultural Sciences. Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2023. 179 p. (In Russ.)

The use of vegetation indices for vegetation analysis [Electronic resource]. URL: https://gisproxima.ru/ispolzovanie_vegetatsionnyh_indeksov?ysclid=lxavkdtdj933222750 (assessed: 12.06.2024) (In Russ.)

Vorobyev O.N., Kurbanov E.A., Gubayev A.V., Demisheva E.N. Method of stepwise classification of satellite images for the thematic mapping of forest cover. *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Forest. Ecology. Nature Management*, 2015, no. 4 (28), pp. 57–72. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Dynamics of spectral brightness of the breed-age structure of groups of forest types on Landsat satellite images. *Forest science*, 2014, no. 5, pp. 3–12. (In Russ.)

Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Long-term dynamics of vegetation indices of dark coniferous forests after damage by Siberian silkworm. *Forest science*, 2016, no. 1, pp. 3–14. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.06.2024

Черниковский Д.М. Оценка возможностей применения материалов спутниковой съемки Sentinel-2 для определения преобладающих древесных пород при таксации лесов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 252. С. 188–210. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.188-210

Исследование посвящено оценке возможностей применения материалов многозональной космической съемки Sentinel-2 в качестве дополнительных материалов для лесотаксационного дешифрирования. Модельной территорией выбрана Лисинская часть Учебно-опытного лесничества (бывший Лисинский учебно-опытный лесхоз), расположенная в Тосненском муниципальном районе Ленинградской области. На основе данных лесоустройства получен набор лесотаксационных выделов, представляющих насаждения основных лесообразующих пород. Критериями отбора служили преобладающая порода, возраст, коэффициент состава, класс бонитета, относительная полнота и площадь. Всего выбрано 384 выдела спелых и перестойных сомкнутых насаждений основных преобладающих пород высоких классов бонитета, преимущественно чистых по составу. Для выбранных выделов с помощью картографического сервиса EO Browser получены материалы безоблачной космической съемки Sentinel-2 за период с апреля по июль 2021 г. Определены значения яркостей каналов Sentinel-2, значимых для изучения растительности, а также рассчитаны значения ряда вегетационных индексов – SR, NDVI, EVI, ARVI, SWVI, NDMI. Оценены изменения средних значений яркостей и вегетационных индексов насаждений преобладающих пород за первые четыре месяца вегетационного периода. В отдельные месяцы были отмечены существенные различия характеристик материалов ДЗЗ для разных пород. Для оценки возможностей определения отдельных древесных пород на основе материалов Sentinel-2 выполнен дисперсионный анализ. В качестве зависимой переменной поочередно рассматривались яркости и вегетационные индексы, в качестве фактора – преобладающая древесная порода. Установлено, что в отдельные месяцы характеристики материалов ДЗЗ для отдельных пород и их групп значительно отличаются. Например, по значениям индекса NDVI в июле отличаются хвойные и лиственные породы. По значениям яркостей каналов B8 и B8A, а также по величине индекса EVI в июле различаются три группы пород –

хвойные (сосна и ель), ольха (серая и черная), а также береза с осиной. Установленные различия характеристик материалов ДЗЗ между отдельными преобладающими породами могут использоваться в качестве дополнительного признака при аналитико-измерительном дешифрировании.

Ключевые слова: вегетационный индекс, дисперсионный анализ, преобладающая порода, признаки дешифрирования, аналитико-измерительное дешифрирование.

Chernikhovskii D.M. Assessment of the possibilities of using Sentinel-2 satellite imagery materials to determine the predominant tree species in forest taxation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoi Akademii*, 2025, iss. 252, pp. 188–210 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.252.188-210

The study is devoted to the identification of the early stages of damage to Norway spruce tree stands by a bark beetle. The scale, intensity and dynamics of bark beetle damage are difficult to predict, and the negative consequences are comparable to the consequences of forest fires. From a practical point of view, it is of crucial importance to identify the initial stage of bark beetle damage, in which colonized trees do not yet show distinct symptoms of damage, and the needles retain their green color. The objective of the study was to study by methods of mathematical statistics changes in the vegetation indices NDVI and SWVI for Norway spruce stands, which in 3 years have gone from healthy to severely damaged, using as an example the sites of mass reproduction of bark beetle and other stem pests identified during a ground survey. The objects of the study were 12 sites of mass reproduction of bark beetles and other stem pests formed in 2021 on the territory of Vyborg and Gatchina districts of the Leningrad region in mature Norway spruce tree stands. During the ground work, the survey and mapping of damaged sites were carried out. With the help of the EO Browser mapping service, Sentinel-2B satellite survey materials for June–September 2020 (no damage), 2021 (early stages of damage) and 2022 (late stages of damage) were received on the territory of the damaged sites. Vegetation indices NDVI and SWVI were calculated on the basis of the received remote sensing materials. With the help of variance analysis, a reliable and significant decrease in the values of both indices was established by the years of damage, as well as by years and months. It is noted that when bark beetles damage plantings, the seasonal dynamics of index values changes. Reliable linear trends of decreasing of both index values by year and month are revealed. Analysis of the sensitivity coefficients and synchronicity of changes in vegetation indices by year and month showed that the decrease in index values occurs independently of external (random) factors, as well as well as not synchronously relative to each other. In practical terms, the revealed patterns of changes in the vegetation indices NDVI and SWVI can serve as a signal about the initial stage of damage to plantings and the basis for conducting ground surveys with the aim of early detection of damage and timely prevention of their spread.

Key words: vegetation index, analysis of variance, predominant tree species, signs of interpretation, analytical and measuring interpretation.

ЧЕРНИХОВСКИЙ Дмитрий Михайлович – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 2189-1988. ORCID: 0000-0002-6375-3080

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: cherndm2006@yandex.ru

CHERNIKHOVSKII Dmitry M. – DSc (Agriculture), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 2189-1988. ORCID: 0000-0002-6375-3080

194021. Institutsky per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: cherndm2006@yandex.ru