

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНОЙ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ LANDSAT-8, SENTINEL-2 (НА ПРИМЕРЕ ЛАНДШАФТНОГО ЗАКАЗНИКА «ОЗЁРЫ»)

Н. А. Шестаков

кафедра геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики
Белорусского государственного университета, г. Минск, nishestakov23@gmail.com

Е. В. Казяк

кафедра геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики
Белорусского государственного университета, г. Минск

В работе представлены результаты анализа спектральной отражательной способности 8 лесобразующих пород территории ландшафтного заказника «Озёры», выполненного на основе мультиспектральных спутниковых изображений Landsat-8 и Sentinel-2A. Были получены и проанализированы значения коэффициентов спектральной яркости пород, выявлены основные закономерности спектральной отражательной способности лесной растительности в зависимости от породного состава и сезонных изменений. Проведена оценка информативности используемых спутниковых данных, определён оптимальный для дешифрирования лесного покрова временной период, сформирована библиотека спектральных данных на базе программного комплекса ENVI 5.3.

Ключевые слова: лесная растительность; породный состав; Landsat-8; Sentinel-2; спектральная отражательная способность; спектральная библиотека.

Введение. Исследование растительных покровов является одним из ведущих направлений дистанционного зондирования Земли. Для получения достоверной и надёжной информации о растительности, в т. ч. лесной, использование одних лишь визуальных различий на изображении космоаэроснимка в некоторых случаях является недостаточным. При современных методах цифровой обработки ДДЗ, основанных на количественном анализе параметров изображения, эффективнее использовать математически определяемые показатели, к числу которых относится *коэффициент спектральной яркости (КСЯ)*. Применение КСЯ как основного дешифровочного признака позволяет дифференцировать лесной покров по породному и возрастному составу, что крайне актуально при решении ряда задач в области лесного хозяйства – составлении и обновлении картографического материала, инвентаризации лесного фонда, мониторинге состояния насаждений, выявлении лесных пожаров, ветровалов, очагов заболевания и распространения насекомых-вредителей, незаконных рубок и пр. [1–3]. Целесообразным в таком случае будет использование материалов мультиспектральных съёмок.

Основная цель исследования заключается в анализе спектральной отражательной способности лесной растительности на основе мультиспектральных спутниковых данных Landsat-8 и Sentinel-2A.

Ход работы. Исследование проводилось на базе программного комплекса ENVI 5.3 и ГИС ArcGIS 10.7.

Для проведения исследования была выбрана территория ландшафтного заказника «Озёры», расположенного в пределах Гродненского и Щучинского районов Гродненской области (физико-географический район Средненёманская низменность, округ Понёманье, Западно-Белорусская провинция). Территория заказника представляет собой сложный лесной и водно-болотный природный комплекс, местами нарушенный хозяйственной деятельностью. Растительный покров в большей степени (до 90 %) образован естественными лесными массивами [4].

Объектом исследования выступал лесной покров территории заказника, представленный наиболее типичными представителями древесной флоры Беларуси такими, как: сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*), ель европейская (*Picea abies*), берёза повислая (*Betula pendula*), ольха чёрная (*Alnus glutinosa*), осина, или тополь дрожащий (*Populus tremula*), дуб черешчатый (*Quercus robur*), граб обыкновенный (*Carpinus betulus*), ясень обыкновенный (*Fraxinus excelsior*) [5].

В качестве исходных данных ДЗЗ были взяты мультиспектральные спутниковые изображения Landsat-8 (OLI) с уровнем обработки L2SP [6] и Sentinel-2A (MSI) с уровнем обработки L2A [7] за период с 24.03.2021 г. по 11.09.2021 г. Высокий уровень обработки используемых спутниковых данных предусматривает устранение технических ошибок сенсора и влияния атмосферной среды. В результате был сформирован набор спутниковых данных, включающий 7 композитных изображений Landsat-8 (7 спектральных каналов) с пространственным разрешением 30 м/пиксель и 7 композитных изображений Sentinel-2A (8 спектральных каналов) с пространственным разрешением 10 м/пиксель (таблицы 1–2, рисунок 1).

Таблица 1

Набор подготовленных спутниковых данных Landsat-8 (OLI)

№	Дата	Время	Path/Row	Облачность	Спектральные каналы
1.	24.03.2021	09:19:06.06	186/023	—	Band 1: Coastal Aerosol (0,443 мкм)
2.	11.05.2021	09:18:50.00	186/023	—	Band 2: Blue (0,482 мкм)
3.	19.06.2021	09:24:55.92	187/022	—	Band 3: Green (0,561 мкм)
4.	28.06.2021	09:19:10.96	186/023	5 %	Band 4: Red (0,654 мкм)
5.	21.07.2021	09:25:02.45	187/022	15 %	Band 5: NIR (0,864 мкм)
6.	22.08.2021	09:25:15.26	187/022	3 %	Band 6: SWIR 1 (1,609 мкм)
7.	07.09.2021	09:25:20.02	187/022	15 %	Band 7: SWIR 2 (2,201 мкм)

Набор подготовленных спутниковых данных Sentinel-2A (MSI)

№	Дата	Время	Номенклатура	Облачность	Спектральные каналы
1.	11.05.2021	09:30:31.02	T35ULV	10 %	Band 2: Blue (0,490 мкм) Band 3: Green (0,560 мкм) Band 4: Red (0,665 мкм) Band 5: VRE 1 (0,705 мкм) Band 6: VRE 2 (0,740 мкм) Band 7: VRE 3 (0,783 мкм) Band 8: NIR (0,842 мкм) Band 8A: NIR narrow (0,865 мкм)
2.	20.06.2021	09:30:41.02	T35ULV	25 %	
3.	30.06.2021	09:30:41.02	T35ULV	1 %	
4.	10.07.2021	09:30:41.02	T35ULV	–	
5.	22.08.2021	09:30:31.02	T35ULV	25 %	
6.	08.09.2021	09:30:31.02	T35ULV	–	
7.	11.09.2021	09:30:31.02	T35ULV	30 %	




Рис. 1. Подготовленные в ENVI 5.3 композитные изображения Landsat-8 (а) и Sentinel-2A (б) на территорию заказника «Озёры» за 11.05.2021 г.

С учётом породного состава насаждений в пределах территории заказника «Озёры» было выделено 3 тестовых участка (рисунок 2).

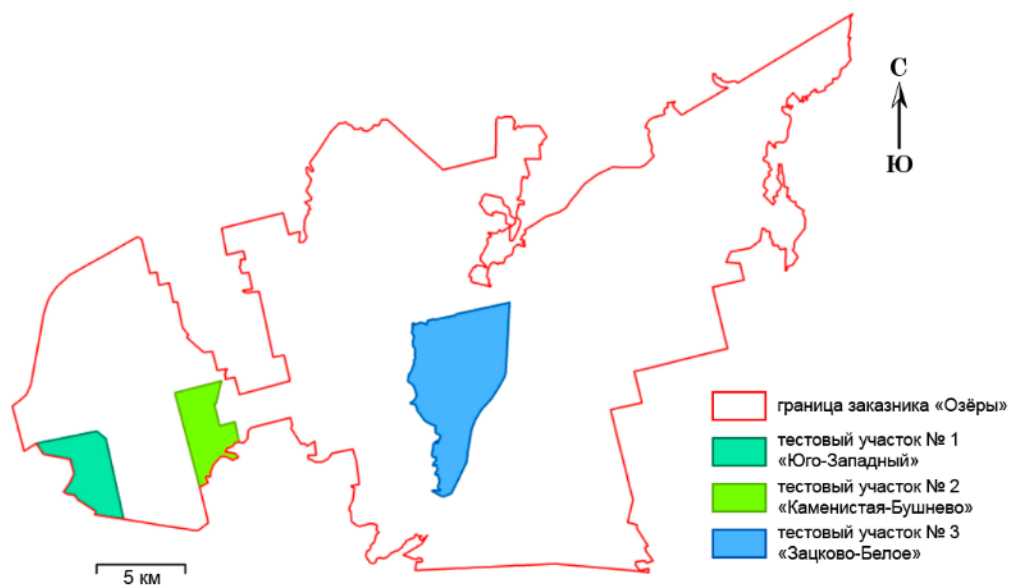


Рис. 2. Расположение тестовых участков на территории заказника «Озёры»

Получение спектральной информации о лесообразующих породах в ENVI осуществлялось путём извлечения усреднённых значений яркости изображения в пределах предварительно нанесённых областей интереса ROI (Region of Interest) [8]. Нанесение обучающих выборок для исследуемых пород выполнялось в 2 этапа:

1) создание в ArcMap векторных полигонов по изображению на снимках Sentinel-2A участков леса соответствующего породного состава, экспорт данных векторного слоя в формат шейп-файла (.shp);

2) загрузка в ENVI созданных векторных полигонов с последующей их конвертацией в формат ROI (.xml).

Местоположение областей интереса ROI определялось следующими критериями: выбранные области должны располагаться в пределах тестовых участков и соответствовать породному составу лесонасаждений; отбирались участки с однородным спектральным откликом; входящая в состав ROI территория должна быть свободна от дымки, облаков, а также их теней.

Результаты. Путём извлечения статистики из областей интереса ROI в ENVI были получены значения КСЯ для 8 исследуемых пород (сосна, ель, берёза, ольха чёрная, осина, дуб, граб, ясень) за установленный период наблюдения. При анализе спектральной яркости лесной растительности различного породного состава были выявлены следующие закономерности:

1. Отмечается *закономерный ход спектральных кривых* для всех исследуемых лесообразующих пород: низкие значения КСЯ в фиолетовой и синей зонах видимого диапазона (каналы 1 и 2 для данных Landsat-8, канал 2 для данных Sentinel-2A); максимум значений КСЯ в зелёной зоне спектра в видимом диапазоне (канал 3 для данных Landsat-8 и Sentinel-2A); минимум спектральной яркости в красной зоне (канал 4 для данных Landsat-8 и Sentinel-2A); резкий рост значений КСЯ с общим максимумом в ближней зоне ИК-диапазона (канал 5 для данных Landsat-8, каналы 8 и 8A для данных Sentinel-2A) (рисунок 3).

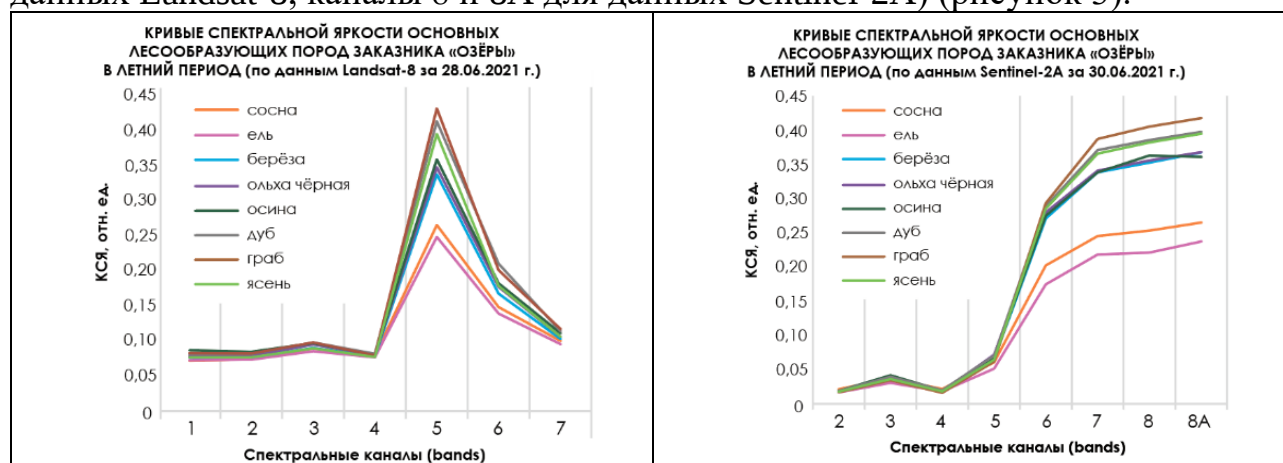


Рис. 3. Кривые спектральной яркости для основных лесообразующих пород заказника «Озёры» с наиболее типичным для лесной растительности ходом в летний период, полученные по данным Landsat-8 (слева) и Sentinel-2A (справа)

2. На основе проведения корреляционного анализа данных *установлена прямая (линейная) связь* между значениями КСЯ 5 достоверно дешифрируемых лесных пород (сосна, ель, берёза, ольха чёрная и осина), извлечёнными в синей, зелёной, красной зонах видимого диапазона, а также в ближней зоне ИК-диапазона по снимкам Landsat-8 (каналы 2, 3, 4, 5) и Sentinel-2A (каналы 2, 3, 4, 8) за две общие даты – 11.05.2021 г. и 22.08.2021 г.

3. Отчётливо наблюдаются *различия спектральных характеристик хвойных и лиственных пород*: для хвойных пород характерны наиболее низкие значения КСЯ, причём для ели в преобладающем большинстве значения в пределах всего хода спектральной кривой будут ниже, чем для сосны. Кроме того, более высокое пространственное разрешение спутниковых данных Sentinel-2A (10 м/пиксель) позволяет установить *различия внутри класса лиственных пород* – положение кривых спектральной яркости для мелколиственных пород (берёза, ольха чёрная, осина) несколько ниже, чем для широколиственных пород (дуб, граб, ясень).

Выявленные при визуальном и количественном анализе кривых спектральной яркости различия служат основанием разделить исследуемые лесообразующие породы на 3 группы: *I группа – хвойные породы с низкой спектральной яркостью* (сосна, ель); *II группа – лиственные породы с пониженной спектральной яркостью* (берёза, осина, ольха чёрная); *III группа – лиственные породы с высокой спектральной яркостью* (дуб, граб, ясень).

Анализ сезонных изменений спектральной яркости лесообразующих пород показал, что:

1. Наименьшие значения спектральной яркости для пород I группы (сосна, ель) отмечаются в конце марта – начале мая, а также в начале сентября, наибольшие – в летний период, причём значения КСЯ в ИК-диапазоне резко возрастают в июне, продолжая увеличиваться вплоть до июля, после чего постепенно снижаются. С наступлением августа наблюдается заметное снижение спектральной яркости – в начале сентября количественные значения яркости сопоставимы со значениями, полученными в начале мая.

2. Самые низкие значения КСЯ для пород II группы (берёза, ольха чёрная, осина) также наблюдаются в весенний и осенний период. При этом за март и май отмечается слабая выраженность максимума в зелёной и минимума в красной зонах видимого диапазона; в июне фиксируются максимальные значения КСЯ, которые начинают постепенно снижаться уже в июле. Спектральные кривые за август – начало сентября располагаются чуть выше весенних графиков.

3. Более высокой спектральной яркостью среди лиственных пород отличаются породы III группы (дуб, граб, ясень). Низкие значения КСЯ регистрируются весной и осенью, в начале лета наблюдается их усиленный рост с максимумом в июне, который закономерно снижается в июле, продолжая убывать с наступлением осени. В целом, динамика изменений в спектральной отражательной способности широколиственных и мелколиственных пород довольно схожа. Более

высокие значения КСЯ дуба, граба и ясеня позволяют более уверенно отделять их от хвойных пород при дешифрировании лесных насаждений по спектральному образу.

Результаты оценки делимости лесных пород по их спектральным признакам указывают на то, что наиболее информативной для распознавания породного состава лесонасаждений является ближняя зона ИК-диапазона – канал 5 для данных Landsat-8 и канал 8 для данных Sentinel-2A. Значительно меньшей информативностью обладают синяя и зелёная зоны – каналы 2 и 3 для Landsat-8 и Sentinel-2A соответственно. Чуть более информативной при сравнении хвойных и лиственных пород является красная зона – канал 4. Стоит отметить достаточно высокую делимость пород в диапазоне каналов 6, 7 и 8A Sentinel-2A, аналоги которых для съёмочной системы OLI Landsat-8 отсутствуют.

С целью **выявления оптимального для дешифрирования лесного покрова по породному составу временного периода** было выполнено сопоставление результатов анализа делимости основных лесообразующих пород территории заказника «Озёры» за исследуемые даты (таблица 3).

Таблица 3

Достоверность взаимного различия значений КСЯ исследуемых лесных пород

КА	Дата	I группа		II группа			III группа		
		сосна	ель	берёза	ольха ч.	осина	дуб	граб	ясень
Landsat-8	24.03.2021	+/-	+/-	—	—	—	—	—	—
	11.05.2021	+/-	+/-	+/-	—	—	—	—	—
	19.06.2021	+	+	+	+	+	+	+/-	+/-
	28.06.2021	+	+	+	+	+	+	+/-	+/-
	21.07.2021	+	+	+	+	+	+	+/-	+/-
	22.08.2021	+	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-	+/-
	07.09.2021	+	+	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-
Sentinel-2A	11.05.2021	+/-	+/-	+/-	—	—	—	—	—
	20.06.2021	+	+	+	+	+	+	+/-	+/-
	30.06.2021	+	+	+	+	+	+	+/-	+/-
	10.07.2021	+	+	+	+	+	+	+/-	+/-
	22.08.2021	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-
	08.09.2021	+	+	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-
	11.09.2021	+	+	+	+/-	+	+/-	+/-	+/-
«+» – достоверность распознавания породы высокая (высокая делимость) «+/-» – достоверность распознавания породы низкая (слабая делимость) «-» – достоверное распознавание породы невозможно									

Завершающим этапом исследования стало **создание библиотеки спектральных данных (БСД)** для основных лесообразующих пород ландшафтного заказника «Озёры», которое осуществлялось в программном комплексе ENVI на основе экспорта средних значений КСЯ внутри областей интереса ROI, нанесённых на изображения участков насаждений соответствующего породного состава (рисунок 4).

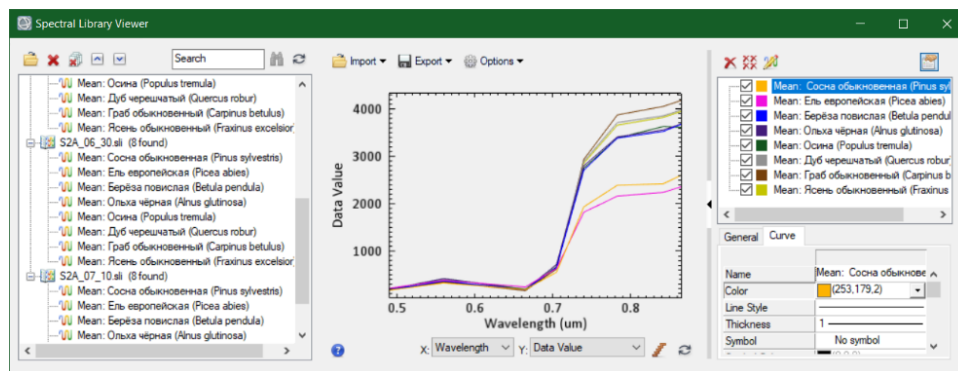


Рис. 4. Фрагмент БСД лесных пород территории заказника «Озёры»: кривые спектральной яркости за 30.06.2021 г., полученные по данным Sentinel-2A

Выводы. В ходе анализа было установлено, что наиболее информативным для изучения лесной растительности является ИК-диапазон, характеризующийся максимальными значениями отражения и высоким уровнем разделимости пород. Наиболее характерный ход спектральных кривых наблюдается в июне–июле. В этот же период отмечаются максимальные различия между группами пород – хвойными с наиболее низкими значениями КСЯ и лиственными, с более высокими значениями КСЯ. Среди лиственных пород можно выделить широколиственные, отличающиеся высокими значениями КСЯ, и «менее яркие» мелколиственные. Оценка уровня разделимости пород варьируется от 5–4 баллов (высокая) для хвойных и широколиственных пород до 2–1 баллов (низкая) при сравнении между собой отдельных лиственных пород.

Таким образом, данные Landsat-8 и Sentinel-2A могут быть совместно использованы в целях картографирования породного состава лесного покрова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Шихов, А. Н. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова. – Пермь: ПГНИУ, 2020. – 191 с.
2. Жарко В. О., Барталёв 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.
3. Person M. Tree Species Classification with Multi-Temporal Sentinel-2 Data // M. Person, E. Lindberg, H. Reese // Remote Sensing. – 2018. Т 10. Р. 1–17.

4. ГПУ «Республиканский ландшафтный заказник «Озёры» [Электронный ресурс]. – 2022. Режим доступа: <https://www.gpu-ozera.by/index.php/ru>. Дата доступа: 05.11.2022.
5. Основные древесные виды Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://lh.belstu.by/?page_id=3877. – Дата доступа: 05.11.2022.
6. Earth Explorer // USGS [Electronic resources]. – 2022. – Mode of access: <https://earthexplorer.usgs.gov>. – Date of access: 05.11.2022.
7. Copernicus Open Access Hub [Electronic resources]. – Mode of access: <https://scihub.copernicus.eu>. – Date of access: 05.11.2022.
8. ENVI 5.1. Руководство пользователя. – М.: Совзонд, 2014. – 242 с.