

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ВОДООХРАННЫХ ЛЕСОВ РЕК РЕСПУБЛИКИ МАРИЙ ЭЛ ПО РАЗНОСЕЗОННЫМ СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Л. В. Тарасова, Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, С. А. Лежнин,
Д. М. Дергунов, А. В. Ястребова

Поволжский государственный технологический университет

Развитие облачных технологий с применением методов классификации на основе алгоритмов машинного обучения способствует развитию анализа и мониторинга лесного покрова с использованием больших объёмов спутниковых данных. Цель исследования – проанализировать возможность применения разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2 (каналы RGB и NIR) для оценки породного состава лесного покрова водоохранных зон рек Республики Марий Эл (РМЭ). Объектами исследования явились лесные насаждения, произрастающие в двухсотметровой буферной (водоохранной) зоне рек длиной более 50 км на территории РМЭ. Разработан алгоритм оценки и проведена управляемая классификация методом RF в GEE (Google Earth Engine) разносезонных данных Sentinel-2 на девять классов наземного покрова (восемь классов древесных пород и один – нелесные территории). На первом этапе были созданы и классифицированы восемь разносезонных изображений Sentinel-2 (каждое содержало четыре спектральных канала RGB и NIR). Далее были созданы и проклассифицированы комбинированные изображения из 16 слоёв (содержащие по два наиболее значимых канала изображений каждого исследуемого периода) и 32 слоёв (содержащие все каналы разносезонных изображений). Точность отдельных разносезонных изображений варьировала от 75 % (сентябрь) до 81 % (август). Максимальная точность классификации была получена с использованием комбинированного изображения из 32 слоёв: общая точность составила 92 %, а коэффициент Каппа – 0,9. Наиболее значимыми спектральными каналами Sentinel-2 для классификации исследуемой территории явились почти все инфракрасные каналы (кроме зимнего), красные каналы майского, августовского, сентябрьского и октябрьского изображений, синие каналы майского, июльского, сентябрьского изображений, зелёные каналы майского и сентябрьского изображений. Использование всех разносезонных каналов Sentinel-2 приводит к максимальной точности классификации по породному составу, так как позволяет учитывать фенологические изменения спектральных характеристик древесных пород в течение года.

Ключевые слова: водоохранные леса, дистанционное зондирование Земли, картографирование, Google Earth Engine (GEE), Sentinel-2, Random Forest (RF).

ALGORITHM FOR ASSESSING RIPARIAN FOREST COVER OF RIVERS IN THE REPUBLIC MARI EL USING MULTI-SEASONAL SATELLITE DATA

L.V. Tarasova, E.A. Kurbanov, O.N. Vorobev, S.A. Lezhnin, D.M. Dergunov, A.V. Yastrebova
Volga State University of Technology

The development of cloud technologies using classification methods based on machine learning algorithms contributes to the development of analysis and monitoring of forest cover using large volumes of satellite data. The goal of the research is to analyse the possibility of using multi-seasonal Sentinel-2 satellite images (RGB and NIR bands) to assess the species composition of forest cover in water protection zones (riparian) of the

Republic Mari El. The objects of the study were forest stands located in a two-hundred-meter buffer (water protection) zone of rivers more than 50 km long on the territory of the Republic of Mari El. The RF (Random forest) method in GEE (Google Earth Engine) was used to classify multi-seasonal Sentinel 2 data into 9 classes of land cover (8 classes of tree species and 1 non-forest area). At the first stage, 8 multi-seasonal Sentinel-2 images were created and classified (each containing 4 spectral bands - RGB and NIR). Next, combined images were created and classified from 16 layers (containing the two most significant spectral bands of each period under study) and 32 layers (containing all bands of multi-season images). The classification accuracy of individual multi-seasonal images ranged from 75% (September) to 81% (August). The maximum classification accuracy was obtained using a combined image of 32 layers: the overall accuracy was 92%, and the Kappa coefficient was 0.9. The most significant Sentinel-2 spectral bands for classifying the study area were almost all infrared bands (except winter), red bands of May, August, September and October images, blue bands of May, July, September images, green bands of May and September images. The use of all multi-season Sentinel-2 bands leads to maximum accuracy of classification by native composition, as it allows taking into account phenological changes in the spectral characteristics of tree species throughout the year.

Keywords: *riparian forests, remote sensing, thematic mapping, Google Earth Engine (GEE), Sentinel-2, Random Forest.*

Введение

Водоохранные (приусловые) леса, представляя собой характерные растительные сообщества на относительно богатых пойменных землях, выполняют различные экосистемные функции (противоэрозионные, водорегулирующие, защитно-аккумулятивные, санитарно-гигиенические, рекреационные) (Воронков, 1988; Кошелева, 2021; Riis et al., 2020). Точная информация о породном составе водоохранных лесов необходима для оценки запасов древостоев в рамках оперативного лесопользования (ЛК РФ, 2006; Распоряжение Правительства «Об утверждении Стратегии ...», 2021; Приказ Минприроды России «Об утверждении Порядка...», 2021). Она необходима для постоянного мониторинга распределения древесных пород и оценки их текущего состояния при принятии обоснованных решений для обеспечения устойчивого управления лесами (Демаков, Исаев, 2019; Выприцкий, Шинкаренко, 2022; Одинцов и др., 2022; Рязанов и др., 2022). Кроме того, знания о породном составе являются важными при оценках биоразнообразия лесов (Никитина и др., 2019; Рябов и др., 2021; Бычков и др., 2022; Чеплянский и др., 2022).

Спутниковые изображения успешно применяются для картографирования растительного покрова пойм рек (Msofe et al., 2019; Rapinel et al., 2019), мониторинга сельскохозяйственных культур (Sitokonstantinou et al., 2018; Yi et al., 2020; Nabil et al., 2022). В ряде исследований анализировалась применимость данных ДЗЗ для картирования типов леса и видов деревьев (Grabska et al., 2019; Ottosen et al., 2020; Bolyn et al., 2022). Полученные учеными результаты, что использование разносезонных изображений, подчеркивающих фенологические различия между видами, позволяет повысить точность классификации растительного покрова, однако требует обработки больших объемов данных (Karasiak et al., 2017; Immitzer et al., 2019; Macintyre et al., 2020).

В последние годы особой популярностью среди ученых пользуется платформа облачных вычислений Google Earth Engine (GEE), предоставляющая доступ к спутниковым изображениям с различных спутниковых датчиков (Modis, Landsat, Sentinel-2). Этот сервис способствует развитию процессов классификации с использованием методов машинного обучения

на основе сезонных данных и временных рядов (Praticò et al., 2021; Kollert et al., 2021; Wu et al., 2021). Среди свободно используемых данных на GEE изображения Sentinel-2 имеют наибольшее пространственное разрешение. Кроме того, временное разрешение Sentinel-2 составляет пять дней, что позволяет выбирать изображения с наименьшей облачностью (Курбанов и др., 2018; Воробьёв и др., 2019; Денисова и др., 2019; Wessel et al., 2018; Wang et al., 2022). В данной работе мы исследовали применение разносезонных данных Sentinel-2, доступных в GEE, для классификации лесного покрова водоохранных зон крупных рек РМЭ (длиной более 50 км).

Цель работы – проанализировать возможность применения разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2 для оценки породного состава лесного покрова водоохранных зон РМЭ.

Для достижения данной цели были решены следующие **задачи**:

- подготовлены разносезонные наборы данных Sentinel-2 на территорию РМЭ и разработан алгоритм для их классификации;
- набраны участки ROI (область интереса - *англ.* Region of interest) на основе проведенных полевых работ в лесных насаждениях водоохранных зон, данных ЦУДМЛ (Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ») и снимков высокого разрешения Google Earth;
- выполнена классификация разносезонных спутниковых изображений Sentinel-2 методом RF в GEE, оценена точность и проведено сравнение результатов классификации различных данных;
- получена тематическая карта наземного покрова и проанализирована структура наземного покрова водоохранных зон.

Объектами исследования явились лесные насаждения, произрастающие в двухсотметровой буферной (водоохранной) зоне участков крупных (длиной более 50 км) рек Республики Марий Эл (табл.1).

Материалы и методы

В 2022-2023 гг. были проведены полевые исследования с закладкой тестовых участков на территории водоохранных лесов РМЭ (рис. 1). 27 тестовых участков закладывались методом круговых реласкопических площадок (Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ «Об утверждении Лесоустроительной...», 2022) в древостоях основных лесообразующих пород. До начала полевых работ с помощью космических снимков высокого разрешения (интернет-ресурсы Google Earth, Yandex) и данных лесоустройства определялись степень однородности лесного насаждения, приуроченность к элементам рельефа местности, транспортная доступность. Географические координаты каждого тестового участка фиксировались на местности с помощью GPS-приёмника «GARMIN eTrex 20» для их последующей идентификации на спутниковых снимках (Курбанов и др., 2015). Для каждого ТУ был описан основной набор таксационных показателей лесных насаждений: породный состав, средняя высота и диаметр насаждения, полнота, сомкнутость полога, возраст преобладающей породы древостоя, состояние нижних ярусов, наличие следов различных природных и антропогенных нарушений.

Таблица 1. Описание крупных рек РМЭ (<https://textual.ru/gvr/>)

Название	Куда впадает	Протяженность общая, км	Протяжен- ность в преде- лах РМЭ, км	Площадь водосбора общая, км ²	Площадь водосбора в пределах РМЭ, км ²
Волга	Каспийское море	3531	150	1360000	23400
Сура	Волга	841	25	67500	91
Дорогуча	Волга	94	63	670	94
Ветлуга	Волга	889	115	39400	2240
Юронга	Ветлуга	88	27,4	1360	446
Люнда	Ветлуга	121	35	1700	330
Юнга	Волга	56	35	436	178
Рутка	Волга	153	102	1950	1304
Парат	Волга	51	41	586	291
Большая Кокшага	Волга	294	156	6330	3192
Большой Кундыш	Большая Кокшага	173	123	1710	1044
Малая Кокшага	Волга	194	194	5160	4760
Ошла	Малая Кокшага	62	53	596	441
Большая Ошла	Малая Кокшага	73	53	681	558
Малый Кундыш	Малая Кокшага	107	107	1227	1227
Илеть	Волга	211	193	6450	5056
Ировка	Илеть	69	69	917	917
Петьялка	Илеть	58	25,5	483	нет данных
Юшут	Илеть	108	108	1203	1203
Немда	Пижма	162	103	3780	2190
Лаж	Немда	73	67	1140	892
Буй	Вятка	92	35	806	388
Уржумка	Вятка	109	45,5	1780	1163

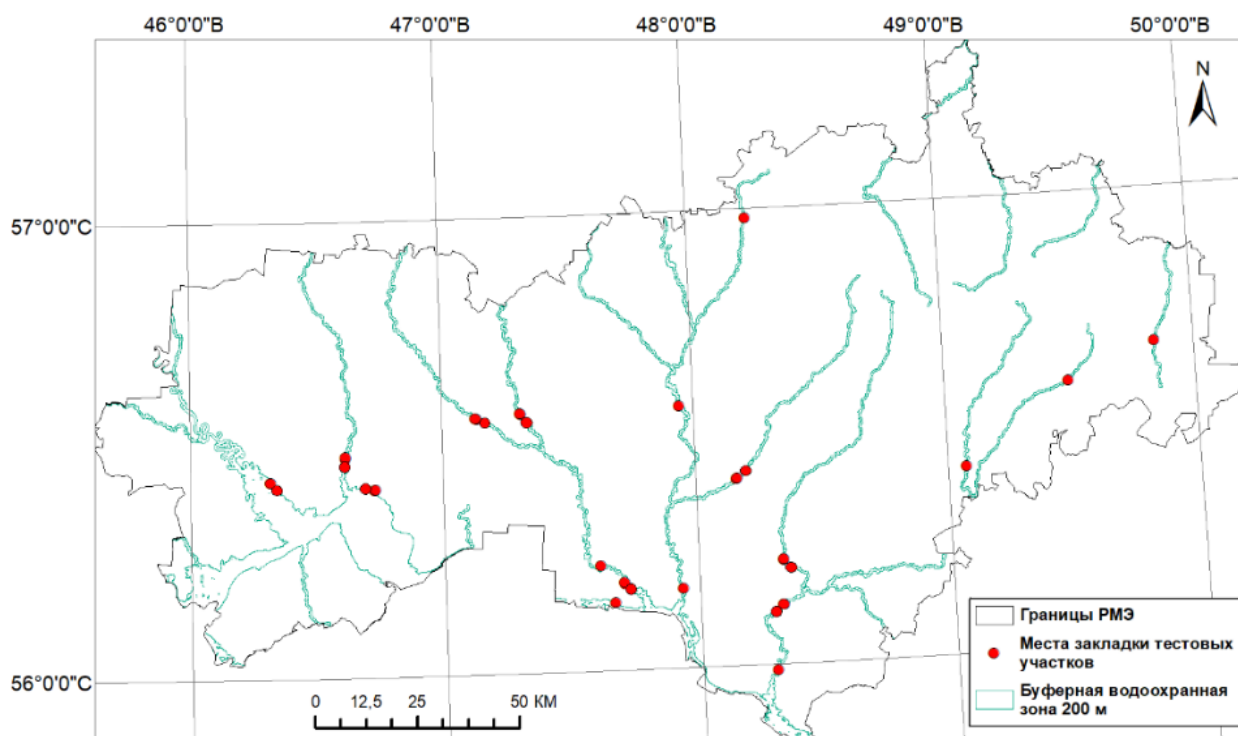


Рис. 1. Распределение тестовых участков на территории РМЭ

Кроме того, для проведения управляемой классификации по данным ЦУДМЛ (Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ»), лесоустройства и снимкам высокого разрешения Google Earth были дополнительно набраны участки ROI (два набора для обучения и валидации) в пакете ENVI 5.2 (табл. 2), которые затем были сохранены в отдельные файлы по тематическим классам в точечном векторном формате. Для оценки, классификации и тематического картографирования водоохранных лесов рек РМЭ были использованы восемь сцен (тайлов) спутника Sentinel-2, покрывающих всю территорию РМЭ (рис. 2).

Таблица 2. Описание участков ROI на территорию исследования

Классы наземного покрова	ROI всего (количество точек в GEE)	Цвет на тематической карте
Ольха (более 70% в составе)	3354	Фиолетовый
Береза (более 70% в составе)	6524	Синий
Липа (более 70% в составе)	4242	Желтый
Дуб (более 70% в составе)	6089	Серый
Осина (более 70% в составе)	2237	Зеленый
Древесно-кустарниковая растительность (ДКР), молодняки	4666	Ярко-зеленый
Смешанные	5218	Коричневый
Хвойные (преимущественно сосна) (более 70% в составе)	8117	Оранжевый
Участки, не покрытые лесом	25139	Черный

Алгоритм классификации растительного покрова водоохранных зон рек по изображениям Sentinel-2 в GEE представлен на рис. 3. На первом этапе были импортированы файлы ROI для классов наземного покрова и 200-метровая буферная зона в векторном формате.

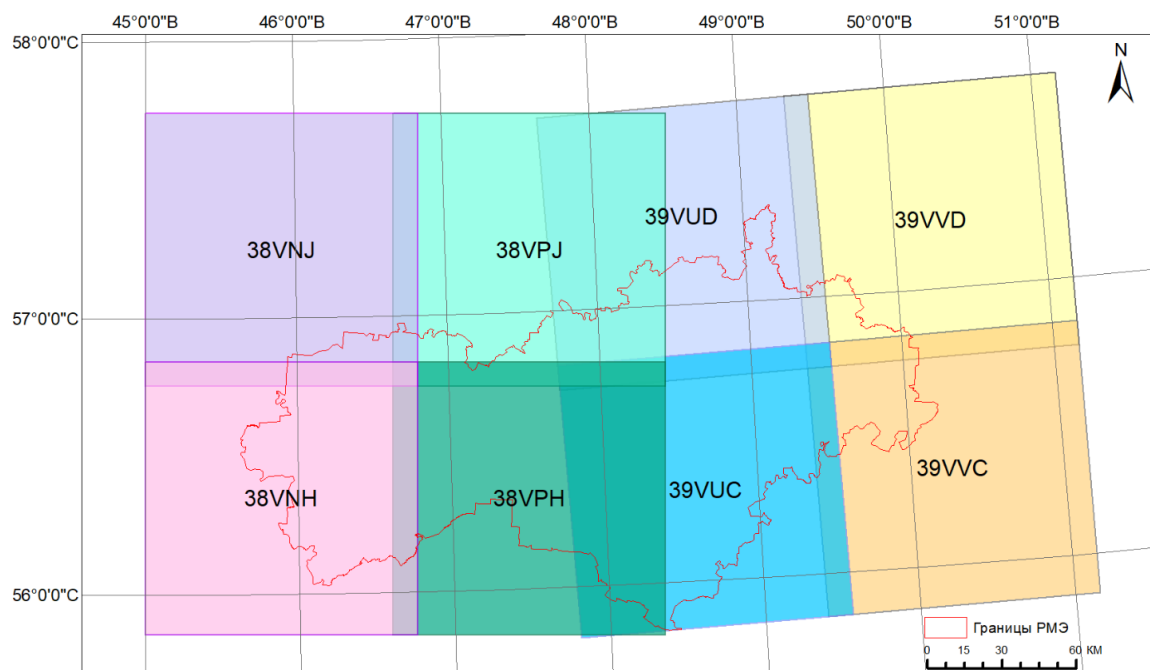


Рис.2. Покрывание сценами (тайлами) Sentinel-2 территории РМЭ

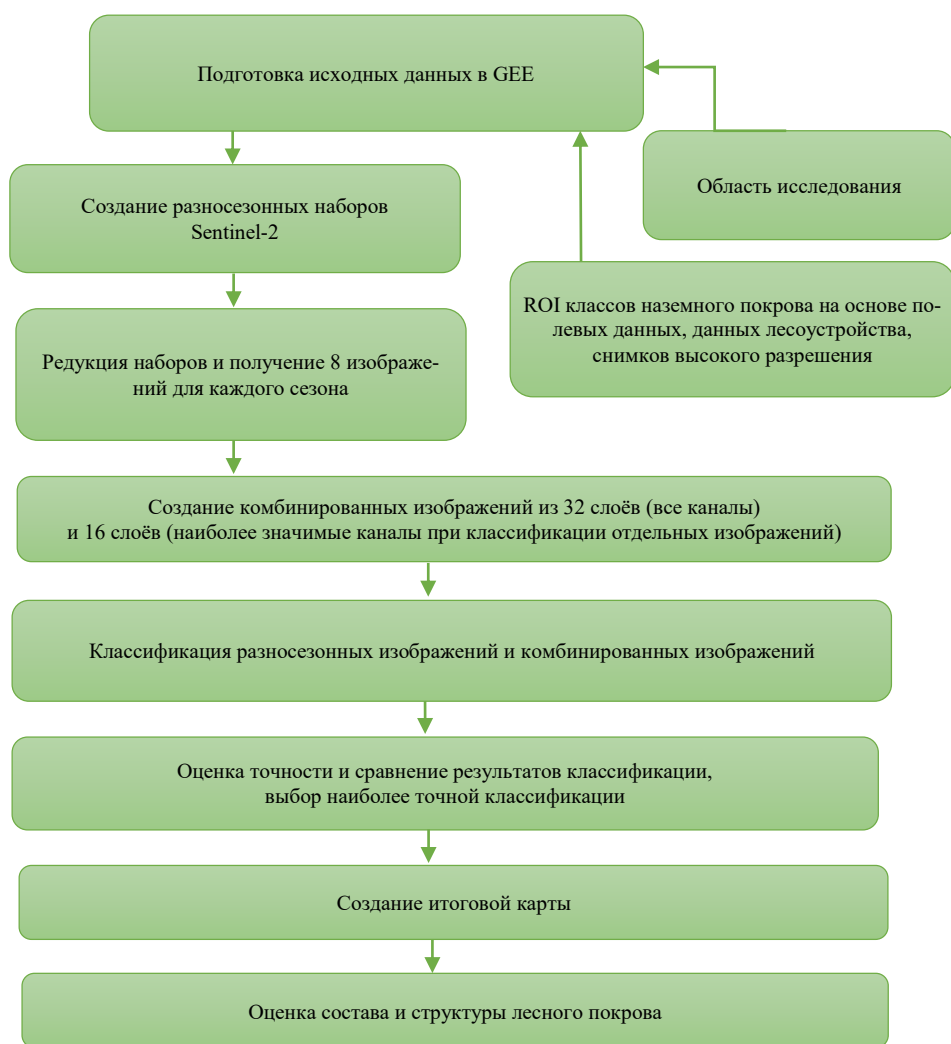


Рис. 3. Алгоритм классификации водоохранных зон рек по данным Sentinel-2 в GEE

Далее было создано восемь разносезонных наборов изображений Sentinel-2 на территорию исследования за 2020-2023 гг. на основе коллекции GEE «COPERNICUS/S2_SR_Harmonized», содержащей данные Sentinel-2 уровня 2A, скорректированные с учетом атмосферы:

- зимний (ноябрь-март), характеризующийся безлиственным состоянием лиственных пород;
- весенний (апрель, май), отражающий период возобновления вегетации;
- летний (июнь, июль, август), соответствующий максимальной продуктивности растительного покрова;
- осенний (сентябрь, октябрь), когда листья лиственных деревьев окрашиваются в желтый и красный цвета (табл.3).

Затем была проведена редукция этих наборов с использованием среднего значения. В результате было получено восемь мозаик сцен на территорию РМЭ (по одной для каждого набора) с четырьмя спектральными каналами RGB и NIR с пространственным разрешением 10 м. Классификация полученных изображений была проведена методом RF (*англ.* Random forest) в GEE («Количество деревьев» было установлено 100, остальные параметры установлены по умолчанию). Таким образом была классифицирована каждая из восьми мозаик сцен разносезонных изображений (RGB + NIR) и их комбинированное изображение, объединенное

в 32 слоя. Также было создано и проклассифицировано изображение из 16 слоев (по два наиболее значимых спектральных канала RGB и NIR), отобранных при классификации отдельных изображений.

Таблица 3. Описание наборов данных

№ п/п	Наименование набора	Количество сцен	Порог облачности, %
1	Зимний (ноябрь-март)	53	2
2	Весенний (Апрель)	31	1
3	Весенний (Май)	36	1
4	Летний (Июнь)	35	0,25
5	Летний (Июль)	23	0,75
6	Летний (Август)	31	0,25
7	Осенний (Сентябрь)	28	15
8	Осенний (Октябрь)	24	2

Оценка точности проведенной классификации была проведена по данным ROI на основе следующих показателей: общей точности классификации (ОА), коэффициента Каппа, точности производителя (РА) и точности пользователя (UA), F-меры (Курбанов и др., 2015; Тарасова и др., 2022; Тарасова и др., 2023). Результаты классификации 10 изображений (8 мозаик сцен разносезонных и 2 комбинированных) показали большую точность для комбинированных (16 и 32 слоя) изображений, которые далее были использованы для создания итоговой карты наземного покрова водоохранной зоны.

Результаты

В результате классификации методом RF разносезонных изображений Sentinel-2 получены карты наземного покрова водоохранных зон рек. Общая точность классификации отдельных разносезонных изображений колеблется от 75 % (сентябрь) до 81 % (август) (табл. 4).

Наибольшая точность (F-мера) среди лиственных пород наблюдается у класса «Берёза» 75 % на майском изображении Sentinel-2. Класс «Ольха» лучше всего выделялся на июньском изображении (55 %). Класс «Осина» имеет более низкие показатели точности: от 29 % (сентябрь) до 46 % (май, июль). Точность распознавания класса «Дуб» колеблется от 43 % (июль, октябрь) до 59 % (май, сентябрь). Класс «Липа» также имеет невысокие показатели точности по отдельным изображениям: от 35 % (сентябрь) до 53 % (октябрь). Класс «ДКР, молодняки» был определен с большей точностью – 59 % по августовскому изображению. Класс «Хвойные» имеет наименьшую точность – 68 % (сентябрь), а наибольшую – 92 % (июнь, октябрь). Точность класса «Смешанные» колеблется от 91 % (по зимнему изображению) до 97 % (по майскому). Класс «Участки, не покрытые лесом» определен с высокой точностью (свыше 92 %) по всем отдельным изображениям.

Среди наиболее значимых каналов (см. табл. 4) по всем разносезонным изображениям Sentinel-2 является NIR инфракрасного диапазона спектра (B8). Для изображений зимы, весны и октября также значимым стал красный канал (B4), для летних изображений – зеленый канал (B3), а для сентябрьского изображения – синий канал (B2).

Классификация комбинированного изображения с 16 слоями на основе наиболее значимых каналов показала более высокие показатели классификации, чем отдельные изображения. Об-

щая точность классификации такого комбинированного изображения составила 91 %, коэффициент Каппа – 0,88 (см. табл. 4). Наименьшая точность наблюдается у классов «Ольха» и «Осина», составляя 58 и 65 % соответственно. Остальные классы были определены с точностью выше 77 %. Комбинированное изображение из всех 32 слоёв продемонстрировало максимальную общую точность классификации – 92 % и коэффициент Каппа – 0,90. Все классы наземного покрова определены с более высокой точностью по сравнению с изображением из 16 слоев за исключением класса «Хвойные», который имеет точность на 0,3% ниже (табл. 4).

Таблица 4. Результаты классификации разносезонных изображений

Сезон изображения	Показатели точности, %	Классы наземного покрова									Общая точность, %	Коэффициент Каппа	Наиболее важные каналы
		Ольха	Осина	Береза	Дуб	Липа	Смешанные	Хвойные	ДКР, молодняки	Участки, не покрытые лесом			
Зимний (ноябрь-март)	РА	36	25	70	37	47	100	99	26	98	78	0,72	B4, B8
	UA	27	42	67	58	50	83	83	49	93			
	F-мера	31	32	69	45	48	91	90	34	96			
Весенний (апрель)	РА	59	31	60	42	43	100	100	23	96	77	0,71	B4, B8
	UA	34	37	65	64	50	92	82	38	89			
	F-мера	43	34	62	51	46	96	90	28	92			
Весенний (май)	РА	62	39	73	52	41	100	89	44	98	81	0,76	B4, B8
	UA	43	55	76	67	60	95	63	62	94			
	F-мера	51	46	75	59	50	97	74	50	96			
Летний (июнь)	РА	66	25	68	39	44	100	100	51	97	80	0,74	B3, B8
	UA	47	45	61	59	61	85	85	60	94			
	F-мера	55	32	65	47	51	92	92	55	95			
Летний (июль)	РА	55	44	68	36	45	100	100	48	98	80	0,75	B3, B8
	UA	48	49	62	54	58	87	80	68	95			
	F-мера	52	46	65	43	51	93	89	56	97			
Летний (август)	РА	54	42	65	46	43	100	99	49	99	81	0,76	B3, B8
	UA	44	46	65	59	58	89	78	73	96			
	F-мера	48	44	65	52	50	94	87	59	97			
Осенний (сентябрь)	РА	45	20	52	53	27	99	90	21	95	75	0,68	B2, B8
	UA	33	53	51	65	50	87	54	47	93			
	F-мера	38	29	52	59	35	92	68	29	94			
Осенний (октябрь)	РА	52	27	65	35	50	100	100	26	98	78	0,72	B4, B8
	UA	31	39	61	55	56	88	85	41	94			
	F-мера	39	32	63	43	53	94	92	32	96			
Комбинированное изображение (16 слоев)	РА	76	57	84	74	82	100	97	71	100	91	0,88	-
	UA	47	75	85	85	80	99	90	84	98			
	F-мера	58	65	84	79	81	100	93	77	99			
Комбинированное изображение (32 слоя)	РА	79	61	88	76	81	100	97	77	100	92	0,90	-
	UA	52	82	87	85	84	99	89	86	99			
	F-мера	63	70	87	80	82	100	93	81	99			

Для комбинированного 32-слойного изображения наиболее значимыми стали инфракрасный канал (B8) (за исключением зимнего); красный канал (B4) майского, августовского, сентябрьского и октябрьского изображений; синий канал (B2) майского, июльского и сентябрьского изображений; зеленый канал (B3) майского и сентябрьского изображений (рис. 4).

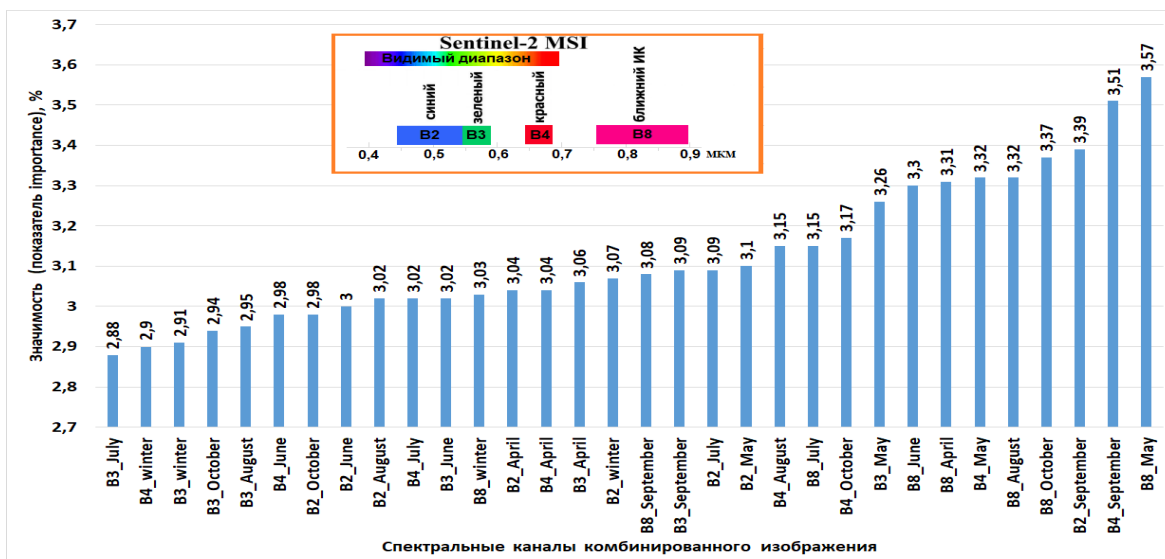


Рис. 4. Значимость для классификации каналов комбинированного изображения из 32 слоёв

Большая часть (10) значимых спектральных каналов отдельных изображений и комбинированного изображения совпадают. Исключение составили каналы B4 и B8 зимнего изображения, B4 апрельского изображения, канал B3 летних изображений. Между тем спектральные каналы B3 и B4 сентябрьского изображения, B2 и B3 майского, B2 июльского, B4 августовского изображений показали большую значимость, чем при классификации отдельных изображений. Таким образом, исключение каналов зимнего изображения и каналов B3 летних изображений при классификации не приведет к существенному снижению точности (в пределах 1%). Наиболее значимыми при классификации комбинированного изображения из 16 слоев стали все выбранные каналы апрельского, майского и октябрьского изображений, а также B2 сентябрьского изображения (рис. 5). Канал B4 зимнего и апрельского изображений оказался более значимым при классификации данного изображения, чем изображения с 32 слоями.

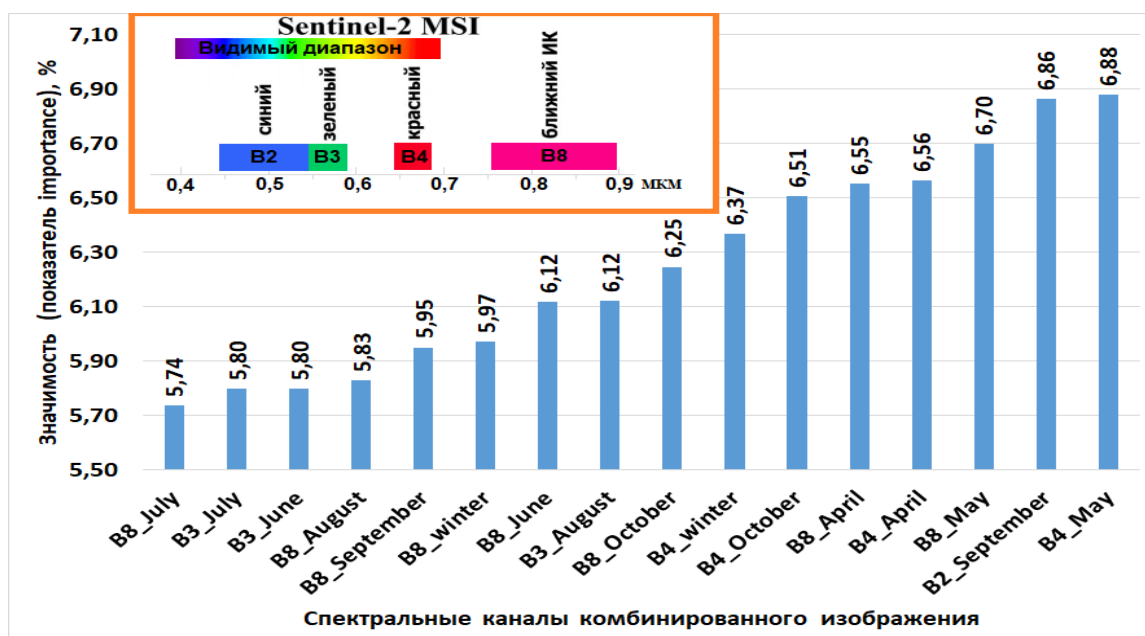


Рис. 5. Значимость для классификации каналов комбинированного изображения из 16 слоёв

Обобщенная информация для лесных классов по месяцам, в которых достигаются максимальные значения показателей точности производителя, пользователя, F-меры, а также наибольшая минимальная попарная разделимость по методике JM с другими классами, представлена в табл. 5.

Таблица 5. Показатели максимальной точности классификации разносезонных спутниковых изображений Sentinel по классам лесного покрова

Показатель	Ольха	Осина	Береза	Дуб	Липа	Смешанные	Хвойные	ДКР, молодняки
max PA	июнь	июль	май	сентябрь	октябрь	зима, апрель, июль	апрель	июнь
max UA	июль	май	май	май	июнь	май	октябрь	август
max F-мера	июнь	май, июль	май	сентябрь	октябрь	май	октябрь	август
разделимость по JM	июнь (дуб)	июль (ольха)	май (осина)	май (ольха)	май (осина)	апрель (дуб)	август (липа)	август (ольха)

Анализ таблицы показывает, что для тематического класса «Ольха» большая часть максимальных показателей приходится на июньское изображение, для «Осины» – майское и июльское, для «ДКР, молодняки» – августовское. Для класса «Берёза» все показатели достигают максимума при использовании майского изображения. Класс «Дуб» показывает максимальную точность производителя и F-меру в сентябре, а точность пользователя и разделимость по JM – в мае. Классы «Липа» и «Хвойные» демонстрируют максимальные значения разделимости на октябрьском изображении. «Смешанные» имеют наибольшие значения показателей точности классификации на весенних изображениях (табл. 5).

Наиболее сложными с точки зрения разделения по JM классам лесного покрова оказываются «Ольха», «Осина» и «Дуб». Майское изображение является наиболее полезным для классификации многих лиственных пород, однако для более точной классификации хвойных необходимы данные других месяцев.

Таким образом, использование всех разносезонных спектральных каналов Sentinel-2 способствовало повышению точности классификации растительного покрова водоохранных зон рек по породному составу. При этом наиболее важной информацией (показатель importance) для классификации с использованием всех 32 слоёв являются данные инфракрасного диапазона спектра на протяжении всего сезона вегетации (апрель-октябрь) и красного диапазона для месяцев наибольших фенологических изменений (май, август, сентябрь, октябрь). Для создания итоговой карты (рис. 6) использовались результаты классификации изображения со всеми 32 слоями. Оценка структуры и площади наземного покрова по классам (табл. 6) проводилась с использованием ArcMap 10.8.1.

Таблица 6. Площадь и структура наземного покрова по классам

Классы наземного покрова	Площадь, га	% от общей площади
Ольха	5864,01	3,96
Осина	4458,94	3,01
Береза	12863,04	8,68
Дуб	8217,41	5,55
Липа	5549,71	3,75
Смешанные	3275,47	2,21
Хвойные (преимущественно сосна)	8846,45	5,97
ДКР, молодняки	9159,34	6,18

Итого лесных насаждений	58234,38	39,31
Участки, не покрытые лесом	89916,35	60,69
Всего	148150,72	100,00

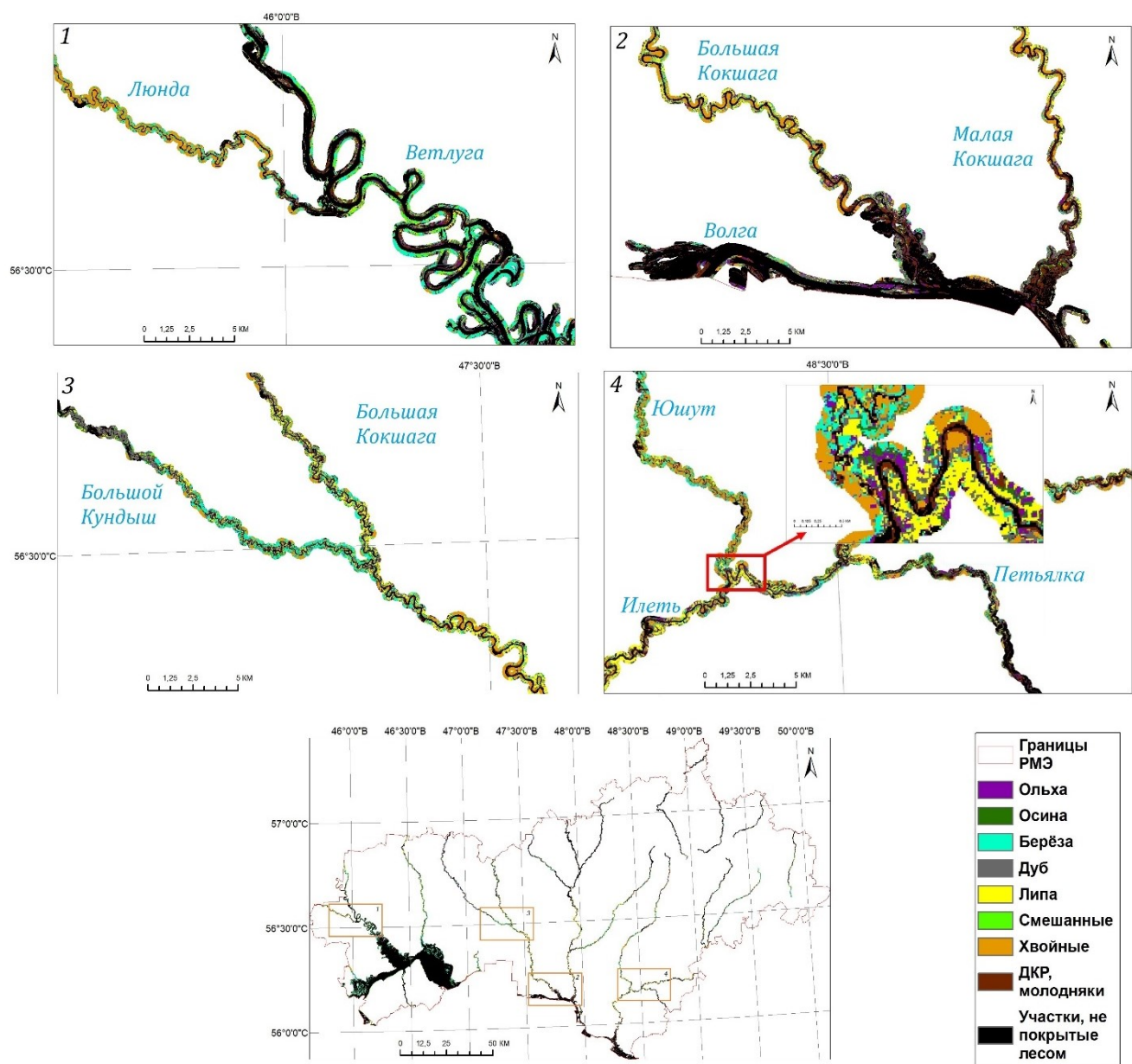


Рис. 6. Итоговая тематическая карта области исследования (внизу) и примеры фрагментов итоговой тематической карты водоохранной зоны рек: 1) Ветлуга, Люнда; 2) Волга, Большая Кокшага, Малая Кокшага; 3) Большая Кокшага, Большой Кундыш; 4) Илеть, Юшут и Петьялка

Лесистость исследуемой территории водоохранных зон рек в 2022 г. составила 39 %. Наибольшую долю в структуре лесного покрова водоохранной зоны (рис. 7) занимают классы «Береза» (22 %), «Древесно-кустарниковая растительность, молодняки» (16 %), «Хвойные (преимущественно сосна)» (15 %), примерно равную долю составляют классы «Ольха» (10 %) и «Липа» (9 %). Наименьшими по площади классами исследуемых лесов являются «Осина» (8 %) и «Смешанные» (6 %).

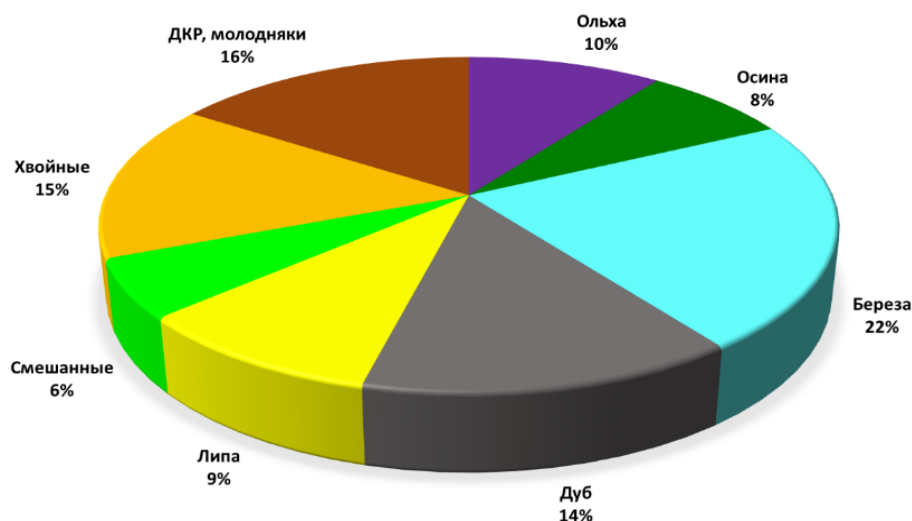


Рис. 7. Структура лесного покрова водоохранной зоны РМЭ

Заключение

Использование всех разносезонных каналов Sentinel-2 приводит к максимальной точности классификации по породному составу, так как позволяет учитывать фенологические изменения спектральных характеристик древесных пород в течение года. Наиболее значимыми спектральными каналами Sentinel-2 для классификации исследуемой территории явились почти все инфракрасные каналы (кроме зимнего), красные каналы майского, августовского, сентябрьского и октябрьского изображений, синие каналы майского, июльского, сентябрьского изображений, зеленые каналы майского и сентябрьского изображений. Лесистость исследуемой территории составила 39 %. Наибольшую долю в структуре лесного покрова водоохранной зоны занимают классы «Береза», «Древесно-кустарниковая растительность, молодняки», «Хвойные».

Применение платформы облачных вычислений GEE позволяет одновременно работать с разновременными данными большого объема, что в свою очередь способствует ускорению процесса обработки и анализа спутниковых изображений. Использование разносезонных изображений и выбор подходящих каналов могут обеспечить повышение точности классификации лесного покрова.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда №22-16-00094, <https://rscf.ru/project/22-16-00094/>.

Библиографический список

1. Бычков И.В., Ружников Г.М., Федоров Р.К., Попова А.К., Авраменко Ю.В. Классификация космоснимков Sentinel-2 Байкальской природной территории // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, №1. С. 90-96. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1022.
2. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А., Демишева Е.Н., Меньшиков С.А., Али М.С., Смирнова Л.Н., Тарасова Л.В. / под общ. ред. проф. Э. А. Курбанова. Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. 166 с.
3. Воронков Н.А. Роль лесов в охране вод. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 279 с.
4. Выприцкий А.А., Шинкаренко С.С. Анализ влияния почвенно-климатических условий на сохранность государственных защитных лесных полос на основе данных Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19, № 5. С.147-163. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.

5. Демаков Ю.П., Исаев А.В. Структура и закономерности развития древостоев в пойменных лесах Республики Марий Эл // Сибирский лесной журнал. 2019. № 6. С. 111–125. DOI: 10.15372/SJFS20190612.
6. Денисова А.Ю., Кавеленова Л.М., Корчиков Е.С., Прохорова Н.Б., Терентьева Д.А., Федосеев Б.А. Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 4. С. 86–101. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101
7. Кошелева О.Ю. Районирование водосборов малых рек юга Приволжской возвышенности по водоохранно-защитной роли лесов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. №1. С. 99–111. DOI 10.37482/0536-1036-2021-1-99-111.
8. Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А., Губаев А.В., Полевщикова Ю.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография. Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015. 131 с.
9. 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.
10. Лесной кодекс (утв. 04.12.2006) №200-ФЗ в ред. от 13.06.2023.3. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/
11. Никитина А.Д., Князева С.В., Гаврилюк Е.А., Тихонова Е.В., Эйлина С.П., Королева Н.В. Картографирование динамики растительного покрова территории национального парка «Куршская коса» по материалам космической съемки Alos и Sentinel-2 // Вопросы лесной науки. 2019. Т. 2, №3. С.1–21. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-21.
12. Одинцов Г. Е., Сабирзянов И. Г., Габделхаков А. К., Рахматуллин З. З. Выявление пожароопасных лесных участков вблизи населенных пунктов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2022. № 8. С. 95–105. DOI: 10.25686/2022.44.54.009.
13. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 5 августа 2022 г. №510 «Об утверждении Лесо-строительной инструкции».
14. Приказ Минприроды России от 27.09.2021 №686 «Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризации лесов». URL: <https://docs.cntd.ru/document/727092651>.
15. Распоряжение от 11 февраля 2021 года №312-р Правительства Российской Федерации «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». <https://docs.cntd.ru/document/573658653>.
16. Рябов В. М., Рябов В. М., Рябова Е. В., Ашихмина Т. Я. Оценка биоразнообразия как механизм изменения статуса особо охраняемых природных территорий // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 3. С. 111–117. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117.
17. Рязанов С.С., Сабиров А.Т., Ульданова Р.А., Кулагина В.И. Оценка противоэрозионной защиты лесными насаждениями прибрежной территории рек Предволжья Республики Татарстан // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2022. № 2. С. 99–114.
18. Тарасова Л.В., Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А., Дергунов Д.М. Использование разносезонных изображений Sentinel-2 для картографирования водоохранных лесов Марийского Заволжья // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг. 2022. №8. С. 65–83. DOI: 10.25686/10.25686.2022.79.42.008.
19. Тарасова Л.В., Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., Лежнин С.А. Оценка разносезонных изображений Sentinel-2 для классификации лесного покрова водоохранных зон рек Марийского Заволжья // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. 2023. № 2 (58). С. 77–92. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.2.77.
20. Чеплянский И. Я., Турчин Т.Я., Ермолова А.С. Дистанционный мониторинг государственных защитных лесных полос степной зоны европейской части России // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 3. С.44–59. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59.
21. Bolyn C., Lejeune P., Michez A., Latte N. Mapping tree species proportions from satellite imagery using spectral-spatial deep learning // Remote sensing of environment. 2022. Vol. 280. Art. No. 113205. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113205.
22. Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K. Forest Stand Species Mapping Using the Sentinel-2 Time Series // Remote Sensing. 2019. Vol. 11, №10. Art. No. 1197. DOI: 10.3390/rs11101197.
23. Immitzer M., Neuwirth M., Böck S., Brenner H., Vuolo F., Atzberger C. Optimal input features for tree species classification in Central Europe based on multi-temporal Sentinel-2 data // Remote sensing. 2019. Vol. 11, № 22. Art. No. 2599. P. 1–23. DOI: 10.3390/rs11222599.
24. Karasiak N., Sheeren D., Fauvel M., Willm J., Dejoux J. -F., Monteil C. Mapping tree species of forests in southwest France using Sentinel-2 image time series. // Proceedings of the 2017 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). Brugge, Belgium, 2017. P. 1–4. DOI: 10.1109/MultiTemp.2017.8035215.

25. 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 // *International journal of applied Earth observation and geoinformation*. 2021. Vol. 94. Art. No. 102208. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102208.
26. Macintyre P., van Niekerk A., Mucina L. Efficacy of multi-season Sentinel-2 imagery for compositional vegetation classification // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Vol. 85. Art. No. 101980. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101980.
27. Msofe N.K., Sheng L., Lyimo J. Land use change trends and their driving forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. № 2. Art. No. 505. P. 1-25. DOI: 10.3390/su11020505.
28. Nabil M., Farg E., Arafat S. M., Aboelghar M., Afify N. M., Elsharkawy M. M. Tree-fruits crop type mapping from Sentinel-1 and Sentinel-2 data integration in Egypt's New Delta project // *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 27. Art. No. 100776. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100776.
29. Ottosen T.B., Petch G., Hanson M., Skjøth C.A. Tree cover mapping based on Sentinel-2 images demonstrate high thematic accuracy in Europe // *International journal of applied Earth observation and geoinformation*. 2020. Vol. 84. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101947.
30. Praticò S., Solano F., Di Fazio S., Modica G. Machine learning classification of Mediterranean forest habitats in Google Earth Engine based on seasonal Sentinel-2 time-series and input image composition optimization // *Remote sensing*. 2021. Vol. 13, №4. Art. No. 586. DOI: 10.3390/rs13040586.
31. Rapinel S., Mony C., Lecoq L., Clément B., Thomas A., Hubert-Moy L. Evaluation of Sentinel-2 time-series for mapping floodplain grassland plant communities // *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 223. P. 115-129. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.018.
32. Riis T., Kelly-Quinn M., Aguiar F. C., Manolaki P., Bruno D., Bejarano M. D. et al. Global overview of ecosystem services provided by riparian vegetation // *BioScience*. 2020. Vol. 70, № 6. P. 501–514. DOI: 10.1093/biosci/biaa041
33. Sitokonstantinou V., Papoutsis I., Kontoes C., Lafarga Arnal A., Armesto Andrés A.P., Garraza Zurbano J.A. Scalable Parcel-Based Crop Identification Scheme Using Sentinel-2 Data Time-Series for the Monitoring of the Common Agricultural Policy // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, № 6. Art. No. 911. DOI: 10.3390/rs10060911
34. Wang M., Zheng Y., Huang C., Meng R., Pang Y., Jia W. et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China // *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9. Art. No. 100032. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100032.
35. Wessel M., Brandmeier M., Tiede D. Evaluation of different machine learning algorithms for scalable classification of tree types and tree species based on Sentinel-2 data // *Remote sensing*. 2018. Vol. 10, № 9. Art. No. 1419. P. 1-21. DOI: 10.3390/rs10091419.
36. Wu N., Shi R., Zhuo W., Zhang C., Zhou B., Xia Z., Tao Z., Gao W., Tian B. A Classification of Tidal Flat Wetland Vegetation Combining Phenological Features with Google Earth Engine // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, №3. Art. No. 443. DOI: 10.3390/rs13030443.
37. Yi Z., Jia L., Chen Q. Crop Classification Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data in the Shiyang River Basin of China // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, № 24. Art. No. 4052. <https://doi.org/10.3390/rs12244052>.

References

1. Bychkov I.V., Ruzhnikov G.M., Fedorov R.K., Popova A.K., Avramenko Y.V. Klassifikatsiya kosmosnimkov Sentinel-2 Baikalskoi prirodnoi territorii (Classification of Sentinel-2 satellite images of the Baikal Natural Territory). *Komp'yuternaya optika*. 2022. Vol.46, No 1. P. 90-96. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-1022.
2. Vorobyev O.N., Kurbanov E. A., Demisheva E.N., Men'shikov S.A., Ali M.S., Smirnova L. N., Tarasova L.V. Distantionnyi monitoring ustoichivosti lesnykh ekosistem: monografiya (Remote monitoring of forest ecosystems sustainability). Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2019, 166 p.
3. Voronkov N.A. Rol' lesov v okhrane vod (The role of forests in water protection). L.: Gidrometeoizdat, 1988. 279 p.
4. Vypritskiy A.A., Shinkarenko S.S. Analiz vliyaniya pochvenno-klimaticheskikh uslovii na sokhrannost' gosudarstvennykh zashchitnykh lesnykh polos na osnove dannykh Sentinel-2 (Analysis of soil and climatic factors influence on the protective forest condition based on Sentinel-2 data). *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2022. Vol. 19. No 5. P.147-163. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-147-163.
5. Demakov Yu.P., Isaev A.V. Struktura i zakonomernosti razvitiya drevostoev v poimennykh lesakh Respubliki Marii El (Structure and regularities of tree stand development in flood-plain forests of Mari El Republic). *Sibirskii lesnoi zhurnal*. 2019. No 6. P. 111–125. DOI: 10.15372/SJFS20190612.
6. Denisova A.Yu., Kavelenova L.M., Korchikov E.S., Prokhorova N.B., Terentyeva D.A., Fedoseev B.A. Prostranstvennaya klassifikatsiya preobladayushchikh drevesnykh porod na territorii Samarskoi oblasti po dannym Sentinel-2 i taksatsii lesa (Tree species classification in Samara Region using Sentinel-2 remote sensing images and forest inventory data). *Sovremennye problemy distantionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16, No. 4. P. 86-101. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-86-101.
7. Kosheleva O.Yu. Raionirovanie vodosborov malyykh rek Yuga Privolzhskoi vozvysheynosti po vodookhranno-zashchitnoi roli lesov (Zoning of catchments of small rivers in the south of the Volga Upland by the water protection role

- of forests). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoy Zhurnal*. 2021. No 1. P. 99-111. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-1-99-111.
8. Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Lezhnin S.A. et al. Tematicheskoe kartirovanie rastitel'no-gopokrova po sputnikovym snimkam: validatsiya i otsenka tochnosti. Monografiya (Thematic land ground cover mapping in satellite images: validation and accuracy appraisal. Monograph). Yoshkar-Ola: PGU, 2015. 131 p.
 9. Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., Men'shikov C.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 (Identification of forest stands and dominant tree species in Penza Region using Sentinel-2 imagery). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. Vol. 15, No. 5. P. 154–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-154-166.
 10. Lesnoi kodeks [Forest Code] (approved on December 4, 2006) No. 200-FZ, as amended. from 13.06.2023. http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_64299/.
 11. Nikitina A.D., Knyazeva S.V., Gavriluk E.A., Tikhonova E.V., Eydlina S.P., Koroleva N.V. Kartografirovaniye dinamiki rastitel'nogo pokrova territorii natsional'nogo parka «Kurshskaya kosa» po materialam kosmicheskoi s"emki Alos i Sentinel-2 (Vegetation cover dynamics mapping of the Curonian Spit national park using satellite imagery Alos and Sentinel-2). *Voprosy lesnoi nauki*. 2019. Vol. 2, No 3. P. 1-21. DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-3-1-21.
 12. Odintsov G.E., Sabirzianov I.G., Gabdelkhakov A.K., Rakhmatullin Z.Z. Vyyavlenie pozharoопасnykh lesnykh uchastkov vblizi naselennykh punktov (Detection of fire-prone forests in close proximity to populated areas). *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring*. 2022. No 8. P. 95-105. DOI 10.25686/2022.44.54.009.
 13. Prikaz Ministerstva prirodnnykh resursov i ekologii RF ot 5 avgusta 2022 g. №510 "Ob utverzhdenii Lesoustroitel'noi instruktsii" (Decree of the Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation from 5 August 2022 g. №510 "About the approval of the wood-building instructions")
 14. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated September 27, 2021. No. 686 "Ob utverzhdenii Poryadka provedeniya gosudarstvennoi inventarizatsii lesov" (On Approval of the Procedure for Conducting State Forest Inventory). <https://docs.cntd.ru/document/727092651>.
 15. Decree of February 11, 2021 No. 312-r of the Government of the Russian Federation "Ob utverzhdenii Strategii razvitiya lesnogo kompleksa Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda" (On Approval of the Strategy for the Development of the Forest Complex of the Russian Federation until 2030). <https://docs.cntd.ru/document/573658653>.
 16. Ryabov V.M., Ryabova E.V., Ashikhmina T.Ya. Otsenka bioraznoobraziya kak mekhanizm izmeneniya statusa osobo okhranyaemykh prirodnnykh territorii (Assessment of biodiversity as a mechanism for changing the status of specially protected natural areas). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2021. No. 3. P.111-117. DOI: 10.25750/1995-4301-2021-3-111-117.
 17. Ryazanov S.S., Sabirov A.T., Ul'danova R.A., Kulagina V.I. Otsenka protiverozionnoi zashchity lesnymi nasazhdeniyami pribrezhnoi territorii rek Predvolzh'ya Respubliki Tatarstan (Evaluation of anti-erosion protection by forest plants of the coastal territory of the Predvolzhie rivers of the Republic of Tatarstan). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2022. No 2. P. 99-114.
 18. Tarasova L.V., Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Lezhnin S.A., Dergunov D.M. Ispol'zovanie raznosezonnykh izobrazhenii Sentinel-2 dlya kartografirovaniya vodookhrannykh lesov Mariiskogo Zavolzh'ya (Mapping of riparian forests in the Mari Volga region using multi-seasonal Sentinel-2 images). *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring*. 2022. No 8. P. 65-83. DOI: 10.25686/10.25686.2022.79.42.008.
 19. Tarasova L.V., Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., Lezhnin S.A. Otsenka raznosezonnykh izobrazhenii Sentinel-2 dlya klassifikatsii lesnogo pokrova vodookhrannykh zon rek Mariiskogo Zavolzh'ya (Assessment of Multi-Season Sentinel-2 Images for Classification of Forest Cover in Riparian Zones of Mari Zavolzh'ye). *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie*. 2023. No 2 (58). P. 77-92. DOI: 10.25686/2306-2827.2023.2.77.
 20. Cheplyanskii I. Ya., Turchin T.Ya., Ermolova A.S. Distantsionnyi monitoring gosudarstvennykh zashchitnykh lesnykh polos stepnoi zony evropeiskoi chasti Rossii (Remote Monitoring of State Forest Shelterbelts in the Steppe Zone of European Russia). *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*. 2022. No 3. P.44-59. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-44-59.
 21. Bolyn C., Lejeune P., Michez A., Latte N. Mapping tree species proportions from satellite imagery using spectral-spatial deep learning. *Remote sensing of environment*. 2022. Vol. 280. Art. No. 113205. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113205.
 22. Grabska E., Hostert P., Pflugmacher D., Ostapowicz K. Forest Stand Species Mapping Using the Sentinel-2 Time Series. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No 10. Art. No. 1197. DOI: 10.3390/rs11101197.
 23. Immitzer M., Neuwirth M., Böck S., Brenner H., Vuolo F., Atzberger C. Optimal input features for tree species classification in Central Europe based on multi-temporal Sentinel-2 data. *Remote sensing*. 2019. Vol. 11, No 22. Art. No. 2599. P. 1-23. DOI: 10.3390/rs11222599.
 24. Karasiak N., Sheeren D., Fauvel M., Willm J., Dejoux J. -F., Monteil C. Mapping tree species of forests in southwest France using Sentinel-2 image time series. *Proceedings of the 2017 9th International Workshop on the Analysis of*

- Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp)*. Brugge, Belgium. 2017. P. 1-4. DOI: 10.1109/Multi-Temp.2017.8035215.
25. 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. *International journal of applied Earth observation and geoinformation*. 2021. Vol. 94. Art. No. 102208. DOI: 10.1016/j.jag.2020.102208.
 26. Macintyre P., van Niekerk A., Mucina L. Efficacy of multi-season Sentinel-2 imagery for compositional vegetation classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2020. Vol. 85. Art. No. 101980. DOI: 10.1016/j.jag.2019.101980.
 27. Msofe N.K., Sheng L., Lyimo J. Land use change trends and their driving forces in the Kilombero Valley Floodplain, Southeastern Tanzania. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. No 2. Art. No. 505. P. 1-25. DOI: 10.3390/su11020505.
 28. Nabil M., Farg E., Arafat S. M., Aboelghar M., Afify N. M., Elsharkawy M. M. Tree-fruits crop type mapping from Sentinel-1 and Sentinel-2 data integration in Egypt's New Delta project. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. 2022. Vol. 27. Art. No. 100776. DOI: 10.1016/j.rsase.2022.100776.
 29. Ottosen T.B., Petch G., Hanson M., Skjøth C.A. Tree cover mapping based on Sentinel-2 images demonstrate high thematic accuracy in Europe. *International journal of applied Earth observation and geoinformation*. 2020. Vol. 84. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.jag.2019.10194.
 30. Praticò S., Solano F., Di Fazio S., Modica G. Machine learning classification of Mediterranean forest habitats in Google Earth Engine based on seasonal Sentinel-2 time-series and input image composition optimization. *Remote sensing*. 2021. Vol. 13, No 4. Art. No. 586. DOI: 10.3390/rs13040586.
 31. Rapinel S., Mony C., Lecoq L., Clément B., Thomas A., Hubert-Moy L. Evaluation of Sentinel-2 time-series for mapping floodplain grassland plant communities. *Remote Sensing of Environment*. 2019. Vol. 223. P. 115-129. DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.018.
 32. Riis T., Kelly-Quinn M., Aguiar F. C., Manolaki P., Bruno D., Bejarano M. D. et al. Global overview of ecosystem services provided by riparian vegetation. *BioScience*. 2020. Vol. 70. No 6. P. 501–514. DOI: 10.1093/biosci/biaa041
 33. Sitokonstantinou V., Papoutsis I., Kontoes C., Lafarga Arnal A., Armesto Andrés A.P., Garraza Zurbano J.A. Scalable Parcel-Based Crop Identification Scheme Using Sentinel-2 Data Time-Series for the Monitoring of the Common Agricultural Policy. *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10, No 6. Art. No. 911. DOI: 10.3390/rs10060911.
 34. Wang M., Zheng Y., Huang C., Meng R., Pang Y., Jia W. et al. Assessing Landsat-8 and Sentinel-2 spectral-temporal features for mapping tree species of northern plantation forests in Heilongjiang Province, China. *Forest Ecosystems*. 2022. Vol. 9. Art. No. 100032. DOI: 10.1016/j.fecs.2022.100032.
 35. Wessel M., Brandmeier M., Tiede D. Evaluation of different machine learning algorithms for scalable classification of tree types and tree species based on Sentinel-2 data. *Remote sensing*. 2018. Vol. 10, No 9. Art. No. 1419. P. 1 21. DOI: 10.3390/rs10091419.
 36. Wu N., Shi R., Zhuo W., Zhang C., Zhou B., Xia Z., Tao Z., Gao W., Tian B. A Classification of Tidal Flat Wetland Vegetation Combining Phenological Features with Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No 3. Art. No. 443. DOI: 10.3390/rs13030443.
 37. Yi Z., Jia L., Chen Q. Crop Classification Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data in the Shiyang River Basin of China. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No 24. Art. No. 4052. DOI: 10.3390/rs12244052.