

СПЕКТРАЛЬНАЯ РАЗДЕЛИМОСТЬ КЛАССОВ НАЗЕМНОГО ПОКРОВА МУХАФАЗА ЛАТАКИЯ СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-2

М. С. Али

Поволжский государственный технологический университет

Дистанционный мониторинг является важным элементом при оценке влияния климатических и антропогенных факторов на состояния растительного покрова Земли, особенно в труднодоступных регионах. При этом необходимо иметь полную информацию о подстилающей поверхности исследуемой территории, включая породный состав произрастающей на ней растительности. Все это актуально для современной Сирийской Арабской Республики, большая часть растительного покрова которой размещается в горных труднодоступных районах. С запуском миссии Sentinel-2 Европейского космического агентства появились новые возможности для своевременного картографирования различных пород деревьев благодаря пространственному, спектральному и временному разрешению сенсоров этого спутника. Целью исследования было провести и оценить спектральную разделимость классов наземного покрова, большинство из которых представлены лесными насаждениями, мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики с использованием спутникового снимка Sentinel-2 и экспериментальных данных полевых исследований. С помощью этих данных была разработана легенда для 13 классов наземного покрова на основе рекомендаций международной организации ФАО по классификации глобального покрова Земли. Спектральная разделимость классов наземного покрова, подробно описанных в разработанной легенде, проводилась по методике Джеффрис-Матусита (мера попарного межкластерного расстояния). Результаты сравнительного анализа полученных результатов показали статистически значимую спектральную разделимость (больше 1,4) для всех 13 классов наземного (растительного) покрова исследуемой провинции. Полученная легенда классов и результаты их спектральной разделимости будут использованы для последующей тематической классификации и картографирования растительного покрова мухафаза Латакия и других районов Сирийской Арабской Республики, имеющих растительный покров.

Ключевые слова: Sentinel-2, растительный покров, Сирийская Арабская Республика, тематическое картографирование, спектральная разделимость, методика Джеффрис-Матусита.

SPECTRAL SEPARABILITY OF LAND COVER CLASSES OF LATAKIA PROVINCE OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC WITH THE USE OF SENTINEL-2

M. S. Ali

Volga State University of Technology

Remote sensing is an important element in assessing the impact of climatic and anthropogenic factors on the state of the Earth's vegetation cover, especially in hard-to-reach regions. In this case, it is necessary to have complete information about the underlying surface of the study area, including the species composition of vegetation growing on it. All this is relevant for the modern Syrian Arab Republic, most of the vegetation of which grows in mountainous inaccessible areas. With the launch of the Sentinel-2 mission of the European Space Agency, new opportunities have appeared for the timely mapping of various tree species due to the spatial, spectral and temporal resolutions of the satellite sensors. The aim of the study was to carry out and evaluate the spectral separability of land cover classes, most of which are represented by forest stands in Latakia province of the Syrian Arab Republic using the Sentinel-2 satellite images and experimental field data. Based on these data, a legend was developed for 13 classes of land cover based on the recommendations of the international organization FAO for the classification of the global Earth cover. The spectral separability of the land cover classes described in detail in the developed legend was car-

ried out according to the Jeffries-Matusita method (a measure inter-cluster distance). The results of a comparative analysis showed a statistically significant spectral separability (greater than 1.4) for all 13 classes of land (vegetation) cover of the area under study. The legend of the classes and the results of their spectral separability will be used for subsequent thematic classification and mapping of the vegetation cover of Latakia province and other areas of the Syrian Arab Republic with the vegetation cover.

Key words: Sentinel-2, vegetation cover, Syrian Arab Republic, thematic mapping, spectral separability, Jeffries-Matusita Technique.

Введение. Тематическое картографирование лесных территорий по спутниковым данным имеет важное практическое значение при ведении лесного хозяйства, мониторинге состояния лесов, оценке биоразнообразия экосистем, а также исследованиях углеродного цикла на региональном и глобальном уровнях (Loboda et al., 2017; Воробьев, Курбанов, 2017). Для этих целей широкое применение находят различные спутниковые системы, изображения которых можно найти в открытом доступе на сайтах ведущих организаций в этой области (USGS, JRC, Copernicus, Роскосмос и др.).

В последние годы стали активно использоваться разновременные спутниковые снимки, которые позволяют выявлять изменения в растительном покрове на больших площадях с течением времени (Hepinstall-Cymerman et al., 2009; Елсаков, Кулюгина, 2014; Helman et al., 2015; Воробьев и др., 2019). Такие подходы особенно применимы при использовании разновременных изображений спутниковой системы Landsat, архивные данные которой можно найти, начиная с 1970-х годов (Барталев и др., 2012; Курбанов и др., 2014; Gomariz-Castillo et al., 2017) или сенсоров MODIS, установленных на спутниках Terra и Aqua (Cai et al., 2014; Курбанов, 2016).

В 2010-х годах стали активно применяться изображения спутниковой системы Sentinel Европейского космического агентства (Meyer et al., 2019; Grabska et al., 2019;). Спутниковые снимки Sentinel-2 высокого разрешения позволяют дешифровать и выделять на тематических картах типы лесов и их породный состав (Immitzer et al., 2016; Puletti et al., 2018; Курбанов и др., 2018, Persson et al., 2019). Среди научных исследований с использованием спутниковых изображений Sentinel-2 стоит также отметить проведение мониторинга растительного покрова саванн Северной Америки (Hill, 2013), оценку содержания хлорофилла в лесном покрове (Frampton et al., 2013; Zarco-Tejada et al., 2019), классификацию альпийской тундровой растительности в Чехии (Kupkova et al., 2017) и наземного покрова в Румынском Закарпатье (Rujoiu-Mare et al., 2017).

Большой интерес при тематической классификации представляет текстурный рисунок полога лесного насаждения, полученный по снимкам Landsat и Sentinel, на примере тропических лесов (Culter et al., 2012; Lu et al., 2014). Оценка текстуры полога, которая характеризует точечную пространственную связь между изучаемым центральным и соседними пикселями изображения ДЗЗ, позволяет усилить дифференциацию типов растительного покрова и определить границы исследуемых признаков (Laurin et al., 2016; Astola et al., 2019; Воробьев и др., 2019a). Данные Sentinel-2 также широко используются для решения задач дистанционного мониторинга растительности (лесов), сельскохозяйственных полей, а также при управлении чрезвычайными ситуациями.

Еще одним важным направлением в обработке данных ДЗЗ является автоматизация процесса картографирования с комбинированием снимков для временных рядов разного пространственного разрешения. Для территории Франции была апробирована методика автоматической управляемой классификации для 17 классов наземного покрова на основе существующих баз данных и свободно доступных изображений ДЗЗ, используемых для обучения и оценки точности картографирования (Inglada et al., 2017). Для автоматического картогра-

фирования иранского региона Голестан была использована комбинированная методика, объединяющая управляемую и неуправляемую классификацию с принятием решений на основе доступных эмпирических данных и снимков Landsat (Mohammady et al., 2015). Полученная тематическая карта для 6 классов наземного покрова показала высокую степень точности с коэффициентом Каппа до 98 %. Полученные результаты подтверждают эффективность таких методик (технологий), позволяющих обеспечивать специалистов оперативно обновляемыми тематическими картами без дорогостоящих полевых исследований для калибровки и проверки используемых моделей (Барталев и др., 2016; Курбанов и др., 2016; Leinenkugel et al., 2019).

Цель работы – провести оценку спектральной разделимости классов растительного (лесного) покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики (САР) по данным спутниковой съемки Sentinel-2.

Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- подобран спутниковый снимок Sentinel-2 на территорию исследования;
- разработана легенда классов лесного покрова на мухафаз Латакия;
- проведена оценка спектральной разделимости подобранных классов растительного покрова с помощью методики «Джеффрис-Матусита».

Материалы и методы

Объект и область исследования

Объектом исследований явились лесные насаждения на территории мухафаза (провинции) Латакия САР (рис. 1), расположенной на восточном побережье Средиземного моря (Воробьев и др., 2019а). В районе исследования преобладает средиземноморский климат, который характеризуется засушливым летом и мягкой, дождливой зимой. Среднее количество осадков составляет около 765 мм в год. Лесные насаждения расположены в основном в прибрежной зоне (Воробьев, Али, 2018).

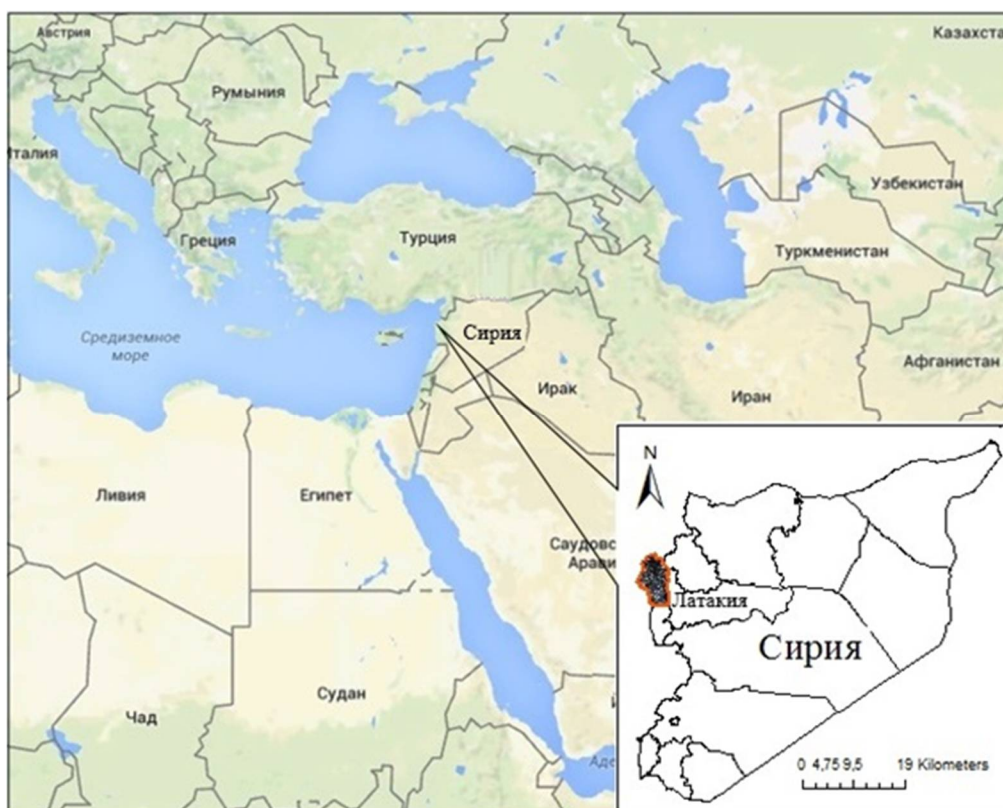


Рис. 1. Мухафаз Латакия на карте САР (Ресурс - Yandex Карта)

В САР площадь лесов оценивается в 240650 га. Леса провинции Латакия составляют 37 % этой площади, что эквивалентно 85000 га. Большие площади высокополнотных лесов в мухафазе Латакия расположены в горных районах с крутыми склонами (Lattakia agriculture ..., 2018). Сам лесной покров провинции можно разделить на несколько типов в зависимости от географического положения: высоты над уровнем моря, удаленности от прибрежной зоны, степени влияния воздушных масс и осадков (Хуссейн и др. 2016). Лесные насаждения САР, произрастающие на горных массивах, распределяются на два типа:

1) Лесные земли на западной части предгорных и горных районов Латакии. Их выделяют по границам высотных ярусов:

- высоты до 200-300 м над уровнем моря. На этой площади расположены небольшие участки местности, которые занимают леса с преобладанием рожкового дерева (*Siliqua ceratonia*) и зарослей фисташки (*Lentiscus pistacia*). На этих участках лесные земли в основном используются под сельскохозяйственные нужды;
- высоты от 300 до 750 м. Этот уровень занимают насаждения с преобладанием дуба кустарникового (*Queues calliprinos*) и фисташки палестинской (*Pistacia Palaestina*);
- высоты от 750 до 850 м представлены дубом заражённым (*Quercus infectoria*). На этом уровне почти не осталось леса, за исключением отдельных участков, разбросанных между сельхозугодиями и садами;
- высоты от 850 до 1200 м заняты насаждениями дуба австрийского (*Quercus cerris*);
- на высотах от 1200 до 1570 м встречается пихта киликийская (*Abies cilicica*).

2) Восточные склоны горных массивов представлены участками лесных массивов:

- на высотах от 300 до 900 м над уровнем моря с преобладанием дуба кустарникового (*Queues calliprinos*) и фисташки палестинской (*Pistacia palaestina*). Начиная с 900 до 1100 м встречаются древостой, представленные дубом австрийским (*Quercus cerris*);
- на высотах от 1100 до 1570 на жестких известняковых скалах произрастают насаждения с преобладанием кедра ливанского (*Cedrus Libani*), а также представленные грабом восточным (*Carpinus orientalis*), дубом ливанским (*Quercus libani*), ясенем манновым (*Fraxinus ornus*), дубом скальным (*Quercus cedrorum*) и др.

На территорию исследования был получен спутниковый снимок Sentinel-2B (S2B_MSI_L1C_20170903T081959_N0205_R121_T36SYE) от 03.09.2017. Изображение с уровнем обработки 1C (Level-1C product) было получено с геопортала Европейской программы «Коперникус» (Copernicus scientific ...). Вся работа с полученным изображением велась в программных комплексах ENVI, ArcGis 10.3, QGIS 3.1. Снимок прошел радиометрическую и атмосферную коррекцию с использованием модуля «Полуавтоматический плагин классификации» (Semi-automatic classification plugin) QGIS 3.1, что позволило снизить влияние атмосферных помех на используемое изображение.

Полевые исследования

Полевые натурные работы на территории исследования были проведены в 2018 году. Во время полевых исследований были заложены тестовые участки (ТУ), репрезентативно представляющие все классы наземного покрова провинции Латакия. Подбор тестовых участков осуществлялся для последующей валидации и оценки точности разрабатываемого картографического материала лесного покрова района Латакия. В качестве вспомогательного материала для полевых работ использовались материалы спутниковой съемки высокого разрешения (другие снимки Sentinel-2), лесные тематические карты, данные министерства сельского хозяйства и аграрной реформы САР, а также информация из открытых интернет-ресурсов (Yandex, Google, DigitalGlobe).

Основные виды работ проводились на лесных участках с наличием древесно-кустарниковой растительности различного породного состава. Главным условием при подбо-

ре тестовых участков была их репрезентативная представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории исследования. Для идентификации на снимке Sentinel-2 площадь тестовых участков на местности составляла не менее 0,5 га. В результате полевых работ было заложено 173 ТУ на разных высотных уровнях и на побережье Средиземного моря. Кроме того, были заложены 150 ТУ на нелесных участках для их точной идентификации, необходимой при проведении классификации изображений с высокой точностью картографирования (рис. 2).

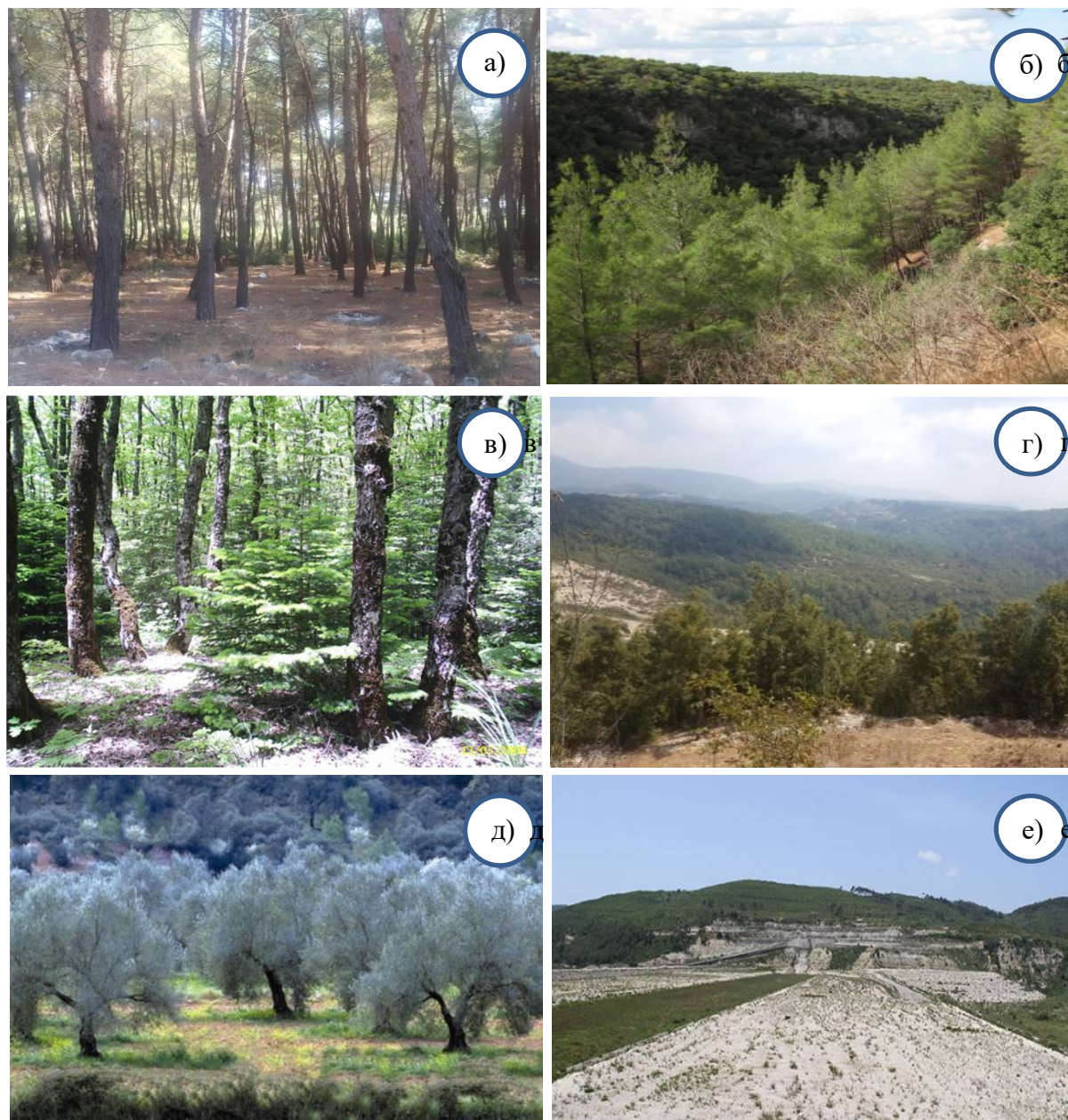


Рис. 2. Примеры тестовых участков: а) сосна калабрийская (*Pinus brutia*); б) древесно-кустарниковая растительность (с преобладанием *Pinus brutia*); в) дуб кустарниковый кермесовый (*Quercus calliprinos*); г) дуб австрийский (*Quercus cerris*); д) фруктовые деревья (оливковые сады); е) открытые участки (Без растительности)

На основе заложенных тестовых участков были выделены доминирующие классы растительного покрова согласно общепринятой международной системе классификации наземного покрова LULC ФАО (Land Cover ...). Легенда для классификации сцены Sentinel-2 (табл. 1) также была сформирована с учетом рекомендаций ФАО (Legend of the global ...) по созданию глобальных карт наземного покрова.

Легенда тематической карты наземного покрова провинции Латакия САР

Наименование класса	Код класса	Описание
Пихта киликийская	ПК	Основной ярус представлен древостоем хвойных пород, более 7 единиц в составе насаждения, высотой более 2 м и сомкнутостью полога более 60 %. Преобладающая порода – пихта киликийская.
Сосна калабрийская	СК	Основной ярус представлен древостоем хвойных вечнозеленых пород, более 7 единиц в составе насаждения, высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 70 %. Преобладающая порода – сосна калабрийская.
Дуб австрийский	ДА	Основной ярус представлен сомкнутым древостоем широколиственных пород деревьев высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 70 %. Более 7 единиц в составе насаждения. Преобладающая порода – дуб австрийский.
Дуб кустарниковый кermесовый	ДК	Основной ярус представлен древостоем лиственных пород высотой более 2 м и сомкнутостью полога более 65 %. Преобладающая порода – дуб кустарниковый составляет более 70 % от состава насаждения.
Древесно-кустарниковая растительность	ДКР	Класс представлен низкорастущими деревьями высотой до 3 м: <i>Pinus brutia</i> , <i>Quercus calliprinos</i> , <i>Ceratonia siliqua</i> , <i>Arbutus andrachne</i> , <i>Rhus cotinus</i> и др. Преобладающая порода – <i>Pinus brutia</i> составляет более 50 % от состава насаждения.
Травянистый сомкнутый	ТС	Основной ярус представлен сомкнутой многолетней травянистой растительностью, с проективным покрытием более 65 %.
Цитрусовые	Ц	Основной ярус представлен цитрусовыми деревьями высотой более 1,5 м и сомкнутостью полога 60-80 %.
Фруктовые деревья	ФД	Основной вид деревьев представлен оливковыми насаждениями высотой более 2 м и сомкнутостью полога 30-60 %. Земли используются также под посадку других видов фруктовых деревьев.
Сельскохозяйственные земли	СЗ	Сезонный максимум сельскохозяйственных соответствует 60-100 % занимаемой площади. Земли в основном используются под выращивание злаковых и овощных культур.
Без растительности (открытые участки)	ОУ	Участки без растительного покрова или с покровом менее 10 % в течение 10 и более месяцев в году (песчаные карьеры, суглинистые почвы).
Населенные пункты (города, поселки)	НП	Класс представлен искусственными объектами, где площадь зданий и сооружений составляет более 40 %; включает смешанный древесный растительный покров с высотой деревьев выше 3 м и сомкнутостью полога менее 10 %.
Водный объект	В	Класс представлен водоемами с наличием воды более 11 месяцев в году.
Облака	О	Класс представлен облачным покровом и тенями от облаков.

Спектральная разделимость

Анализ спектральной разделимости классов наземного покрова проводился на основе тестовых участков, заложенных во время полевых исследований. Эти данные позволяют оценить морфологические особенности исследуемой растительности, а также выявить структурные и физические характеристики объектов, не попадающих в класс лесная растительность. Для проведения классификации фрагмента сцены спутника Sentinel-2B была подготовлена обучающая выборка в виде ROI (Region of interest), сформированная на основе данных тестовых участков и экспертного анализа данных. Точность тематической классификации в значительной степени определяется уровнем спектральной разделимости созданной ROI.

Обычно спектральная разделимость объектов местности с высокой фрагментацией или сложным рельефом на изображениях ДЗЗ с низким или средним разрешением является не-

простой задачей. Поэтому до проведения процедуры классификации спутникового снимка используемые тестовые участки и ROI были проанализированы на спектральную разделимость с использованием методики Джеффрис-Матусита (JM) (мера межкластерного расстояния), которая вычисляется путем сравнения каждой пары тестовых участков (Huang et al., 2016; Kurbanov et al., 2019). Значения статистической разделимости выбранных ROI могут варьировать от 0 до 2, а значение индекса выше 1,41 свидетельствует о хорошей спектральной разделимости исследуемых классов наземного покрова (Chuviesco, 2016).

Результаты исследования и их обсуждение

Точность классификации в значительной степени определяется уровнем спектральной разделимости ROI. Результат этого анализа разделимости представлен в таблице 2.

Таблица 2

Разделимость классов наземного покрова провинции Латакия по методике Джеффрис-Матусита

	ПК	СК	ДА	ДК	ДКР	ТС	Ц	СЗ	ФД	ОУ	НП	В	О
ПК		1,79	1,94	1,87	1,94	1,99	1,99	1,99	1,99	2,00	1,99	2,00	2,00
СК			1,72	1,68	1,66	1,98	1,82	1,98	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
ДА				1,66	1,72	1,87	1,94	1,99	1,76	1,99	1,97	2,00	1,99
ДК					1,57	1,87	1,64	2,00	1,99	2,00	2,00	2,00	2,00
ДКР						1,77	1,65	1,85	1,87	1,99	1,88	1,98	2,00
ТС							1,81	1,65	1,88	1,96	2,00	1,86	1,99
Ц								1,90	1,99	1,99	2,00	1,99	2,00
СЗ									1,72	1,93	1,90	1,99	2,00
ФД										1,99	1,78	2,00	2,00
ОУ											1,91	2,00	2,00
НП												2,00	2,00
В													2,00
О													

Попарный анализ по методике JM свидетельствует о высокой разделимости для большинства рассматриваемых классов, значения статистической разделимости для которых составляют выше 1,4. Значения расстояния JM между 1,4-1,8 для классов ДК - ДА, ДК - ДКР, ДКР - Ц, ДК - Ц показывают сложность выявления различий между ними, несмотря на использование оптимально подобранных классификационных признаков (пороговый анализ спектральных значений, текстурные показатели и т.п.). Диаграмма рассеяния для 6 классов растительного покрова в пространстве спектральных значений показана на рисунке 3.

Как видно на рисунках 3 и 4, в некоторых случаях границы перехода одного класса в другой достаточно условны. Для близких по породному составу классов ДК и ДА наблюдается относительное смешивание, что связано со схожестью в вегетации и спектральных характеристиках. Тем не менее, эти классы растительного покрова могут отличаться по форме крон, пространственному распределению, текстуре рисунка полого. Иначе говоря, несмотря на близость спектральных значений для оцениваемых классов древесно-растительного покрова,

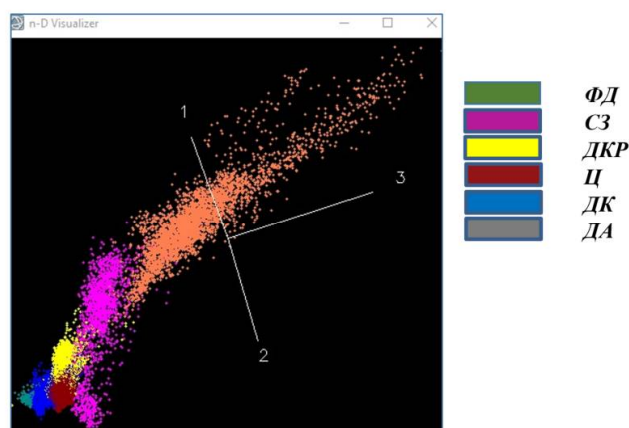


Рис. 3. Диаграмма рассеяния спектральных значений 6 классов растительного покрова провинции Латакия САР

они имеют свои индивидуальные особенности. Это позволяет выделить их при сравнительном статистическом анализе спектральных данных.

По рисунку 4 видно, что на снимке Sentinel-2В классы наземного покрова, обладающие большей полнотой растительного полога (особенно в красной (b3), зеленой (b2) и синей (b1) зонах электромагнитного спектра), имеют близкие спектральные значения (кривые). Тем не менее, даже визуально (графически) наблюдается четкое различие между всеми классами наземного покрова провинции Латакия, значение JM для которых в большинстве случаев приближается к 2.

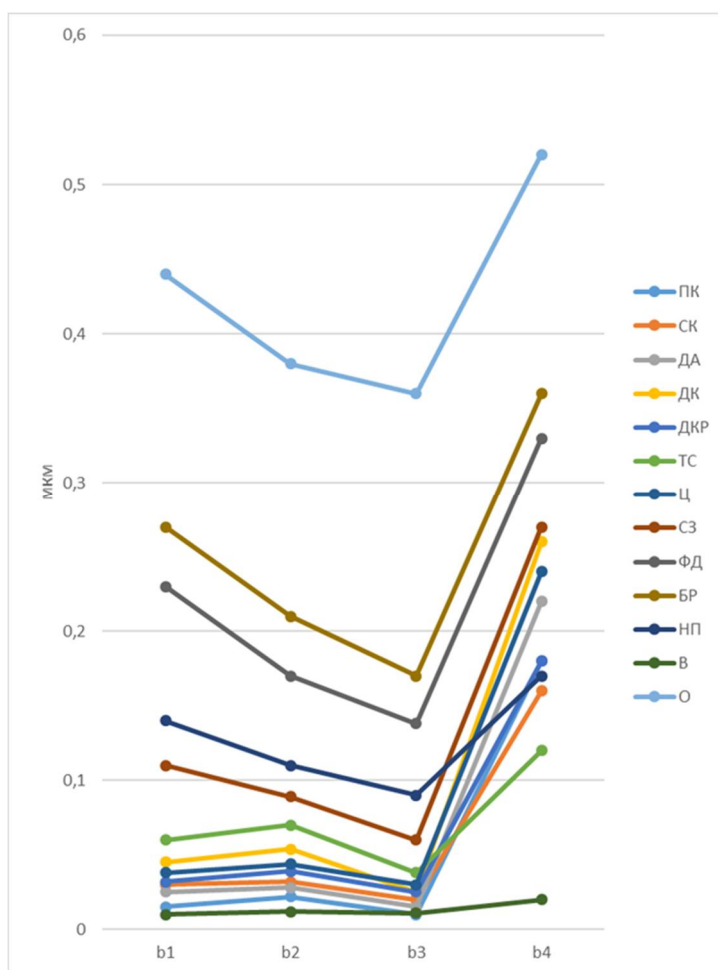


Рис. 4. Кривые спектральной яркости для 13 оцениваемых классов наземного покрова территории исследования по спектральным каналам

Заключение

Возможность удаленного картографирования растительного покрова лесных экосистем, включая произрастающих на горных участках, позволяет осуществлять оценку и мониторинг их состояния, который сложно проводить в полевых условиях. Все это особенно актуально для современной Сирийской Арабской Республики. На сегодняшний день для картографирования растительного покрова широко используют спутник Sentinel-2 Европейского космического агентства, пространственное разрешение которого (10 м) позволяет дешифровать породный состав исследуемых лесных насаждений.

В работе проведены подбор одного снимка Sentinel-2В на территорию провинции Латакия САР, его предварительная обработка и подготовка к тематической классификации. На основе результатов полевых работ и других эмпирических данных были выделены 13 классов наземного покрова на исследуемой территории. Предварительная оценка на спектральную разделимость всех подобранных классов по методике межкластерного расстояния Джеффрис-Матусита между их парами показала приемлемые результаты, статистически подтвержденные значениями JV выше порогового значения 1,4. Все это свидетельствует о том, что полученный набор обучающей выборки в виде ROI классов наземного покрова может быть успешно использован для проведения дальнейшей процедуры классификации изображения Sentinel-2В.

Библиографический список

1. Барталев, С.А. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9, № 2. – С. 9-26.
2. Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
3. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14). – С. 124-134.
4. Воробьев, О.Н. Пространственно-временной анализ динамики лесного покрова в Среднем Поволжье по спутниковым данным: монография / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019. – 200 с.
5. Воробьев, О.Н. Классификация лесного покрова мухафаза Латакия Сирийской Арабской Республики по данным спутника Sentinel-2 [Электронный ресурс] / О.Н. Воробьев, М.С. Али // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей / Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – № 4. – С. 110-122. – URL: <https://inter.volgattech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>
6. Елсаков, В.В. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий / В.В. Елсаков, Е.Е. Кулюгина // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 3. – С. 65-77.
7. Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 154-166.
8. Курбанов Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 36-48.
9. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.
10. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей [Электронный ресурс] / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – № 2. – С. 123-132. – URL: <https://inter.volgattech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/Forest%20ecosystem%20under%20climate%20change%202016.pdf>
11. Хуссейн, А. Национальный доклад о биологическом разнообразии генетических ресурсов для производства продовольствия и ведения сельского хозяйства в Сирийской Арабской Республике / А. Хуссейн, Д. Моваффак, В. Юсеф. – Дамаск, 2016. – 212 с.

12. Astola, H. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region / H. Astola, T. Häme, L. Sirro, M. Molinier, J. Kilpi // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – Vol. 223. – P. 257-273
13. Cai, S. Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm / S. Cai, D. Liu, D. Sulla-Menashe, M.A. Friedl // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – Vol. 147. – P. 243-255.
14. Chuvieco, E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition / E. Chuvieco // New York: CRC Press Taylor & Francis. – 2016. – 468 p.
15. Copernicus scientific data hub [Electronic resource]. – URL: <https://scihub.copernicus.eu/>
16. Cutler, M.E.J. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: An Assessment of Predictions Between Regions / M.E.J. Cutler, D.S. Boyd, G.M. Foody, A. Vetrivel // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 70, ID 042032. – P. 66-77.
17. Frampton, W.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation / W.J. Frampton, J. Dash, G. Watmough, E.J. Milton // *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. – 2013. – Vol. 82. – P. 83-92.
18. Gomariz-Castillo, F. Improving classification accuracy of multi-temporal Landsat images by assessing the use of different algorithms, textural and ancillary information for a Mediterranean semiarid area from 2000 to 2015/ F. Gomariz-Castillo, F. Alonso-Sarria, F. Cánovas-García // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9(10): 1058. – P. 1-23.
19. Grabska, E. Forest stand species mapping using the Sentinel-2 time series / E. Grabska, P. Hostert, D. Pflugmacher, K. Ostapowicz // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 10: 1197. – P. 1-24.
20. Helman, D.A. A phenology-based method for monitoring woody and herbaceous vegetation in Mediterranean forests from NDVI time series / D. Helman, I.M. Lensky, N. Tessler, Y. Osem // *Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 7, No. 9, 12314-12335.
21. Hepinstall-Cymerman, J. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling / J. Hepinstall-Cymerman, S. Coe, M. Alberti // *Remote Sensing*. – 2009. – No. 1. – P. 1353-1379.
22. Hill, M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect / M.J. Hill // *Remote sensing of environment*. – 2013. – Vol. 137. – P. 94-111.
23. Huang H. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination / H. Huang, D.P. Roy, L. Boschetti, H.K. Zhang, L. Yan, S.S. Kumar et al. // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, No. 10. – P. 873.
24. Immitzer, M. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classification in Central Europe/ M. Immitzer, F. Vuolo, C. Atzberger // *Remote Sensing*. – 2016. – No. 8(16). – P. 166-193.
25. Inglada, J. Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series / J. Inglada, A. Vincent, M. Arias, B. Tardy, D. Morin, I. Rodes // *Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 9 (1), ID 95.
26. Kupkova, L. Classification of tundra vegetation in the Krkonose Mts. National Park using APEX, AISA Dual and Sentinel-2A data / L. Kupkova, L. Cervena, R. Sucha, J. Jakesova // *European Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 50. – P. 29-46.
27. Kurbanov, E.A. Tree species classification with Sentinel-2 data in European part of Russia / E.A. Kurbanov, O.N. Vorobev, S.A. Menshikov, M.S. Ali / *Earth observation advancements in a changing world*. – 2019. – Vol. 1. – P. 33-36
28. Land Cover Classification System [Electronic resource]. – URL: <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>
29. Lattakia agriculture directorate. Forest Fire Management Plan. – Lattakia, 2018. – P. 1-48.
30. Laurin, G.V. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data / G.V. Laurin, N. Puletti, W. Hawthorne, V. Liesenberg, P. Corona, D. Papale, et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 176. – P. 163-176.
31. Legend of the global CCI-LC maps, based on LCCS [Electronic resource]. – URL: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>. – 25.12.2019
32. Leinenkugel, P. The potential of open geodata for automated large-scale land use and land cover classification / P. Leinenkugel, R. Deck, J. Huth, M. Ottinger, B. Mack // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 19: ID 2249.
33. Loboda, T. Land Management and the impact of the 2010 extreme drought event on the agricultural and ecological systems of European Russia / T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*. Eds. G. Gutman, R. Volker. – 2017. – P. 173-192.
34. Lu, D. The roles of textural images in improving land-cover classification in the Brazilian Amazon / D. Lu, G. Li, E. Moran, L. Dutra, M. Batistella // *International Journal of Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 35. – P. 8188-8207.
35. Meyer, L.H. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests / L.H. Meyer, M. Heurich, B. Beudert, J. Premier, D. Pflugmacher // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, No. 10. – ID: 1160.
36. Mohammady, M. A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran / M. Mohammady, H.R. Moradi, H. Zeinivand, A.J.A.M. Temme // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2015. – No. 12. – P. 1515-1526.
37. Puletti, N. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments / N. Puletti, F. Chianucci, C. Castaldi // *Annals of Silvicultural Research*. – 2018. – Vol. 42, No. 1.
38. Rujoiu-Mare, M.R. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery / M.R. Rujoiu-Mare, B. Olariu, B.A. Mihai, C. Nistor, I. Savulescu // *European Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 50. – P. 496-508.

39. Zarco-Tejada, P.J. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyper-spectral imagery in the context of forest decline / P.J. Zarco-Tejada, A. Hornero, P.S.A. Beck, T. Kattenborn, P. Kempeneers, R. Hernández-Clemente // *Remote sensing of environment*. – 2019. – Vol. 223. – P. 320-335.

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Stytsenko F.V., Flitman E.V. Otsenka ploshchadi pozharov na osnove kompleksirovaniya sputnikovyykh dannyykh razlichnogo prostranstvennogo razresheniya MODIS i Landsat-TM/ETM+ [Assessment of the area of fires based on the integration of satellite data of various spatial resolutions MODIS and Landsat-TM / ETM +], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, T.9, No. 2, pp. 9-26.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii [Satellite mapping of Russian land cover], Moskva: IKI RAN, 2016, 208 p.
3. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A. Distantsionnyi monitoring vosstanovitel'noi dinamiki rastitel'nosti na garyakh Mariiskogo lesnogo Zavolzh'ya [Remote monitoring of the restoration dynamics of vegetation in the burned areas of the Mari forest Trans-Volga], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2017, No. 2 (14), pp. 124-134.
4. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A., Polevshchikova Yu.A., Lezhnin S.A. Prostranstvenno-vremennoi analiz dinamiki lesnogo pokrova v Srednem Povolzh'e po sputnikovym dannym [Space-time analysis of the dynamics of forest cover in the Middle Volga region using satellite data]: monografiya, Ioshkar-Ola: PGU, 2019, 200 p.
5. Vorob'ev O.N., Ali M.S. Klassifikatsiya lesnogo pokrova mukhafaza Latakia Siriiskoi Arabskoi Respubliki po dannym sputnika Sentinel-2 [Forest cover classification of Latakia governorate of the Syrian Arab Republic according to Sentinel-2 satellite], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring]: sbornik nauchnykh statei [Electronic resource], Ioshkar-Ola: PGU, 2018, No. 4, pp. 110-122, URL: <https://inter.volgatex.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>
6. Elsakov V.V., Kulyugina E.E. Rastitel'nyi pokrov Yugorskogo poluostrova v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii poslednykh desyatiletii [Vegetation cover of the Ugra Peninsula under the conditions of climatic changes of recent decades], *Issledovanie Zemli iz kosmosa* [Earth exploration from space], 2014, No. 3, pp. 65-77.
7. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Men'shikov S.A., Smirnova L.N. Raspoznavanie lesnykh nasazhdenii i dominiruyushchikh drevesnykh porod Penzenskoi oblasti po dannym sputnika Sentinel-2 [Recognition of forest plantations and dominant tree species of the Penza region according to the Sentinel-2 satellite], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2018, T. 15, No. 5, pp. 154-166.
8. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A. Otsenka tochnosti i sopostavimosti tematiceskikh kart lesnogo pokrova raznogo prostranstvennogo razresheniya na primere Srednego Povolzh'ya [Evaluation of the accuracy and comparability of thematic maps of forest cover of different spatial resolutions on the example of the Middle Volga], *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2016, T. 13, No. 1, pp. 36-48.
9. Kurbanov E.A., Vorob'ev O.N., Gubaev A.V., Lezhnin S.A., Polevshchikova Yu.A., Demisheva E.N. Chetyre desyatiletia issledovaniy lesov po snimkam Landsat [Landsat's four decades of forest research], *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga State Technological University. Ser.: Forest. Ecology. Nature management], 2014, No. 1(21), pp. 18-32.
10. Kurbanov E.A. Dva desyatiletia issledovaniy rastitel'nogo pokrova po MODIS [Two decades of land cover research by MODIS] [Electronic resource], *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring: sbornik nauchnykh statei* [Forest Ecosystems under Climate Change: Biological Productivity and Remote Monitoring: A Collection of Scientific Articles], Ioshkar-Ola: PGU, 2016, No. 2, pp. 123-132, URL: <https://inter.volgatex.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/Forest%20ecosystem%20under%20climate%20change%202016.pdf>
11. Khussein A., Movaffak D., Yusef V. Natsional'nyi doklad o biologicheskom raznoobrazii geneticheskikh resursov dlya proizvodstva prodovol'stviya i vedeniya sel'skogo khozyaistva v Siriiskoi Arabskoi Respublike [National report on the biological diversity of genetic resources for food and agriculture in the Syrian Arab Republic], Damask, 2016, 212 p.
12. Astola H., Häme T., Sirro L., Molinier M., Kilpi J. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 223, pp. 257-273
13. Cai S., Liu D., Sulla-Menasse D., Friedl M.A. Enhancing MODIS land cover product with a spatial-temporal modeling algorithm, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 147, pp. 243-255.
14. Chuvieco E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition. Boca Raton, New York: CRC Press Taylor & Francis, 2016, 468 p.
15. Copernicus scientific data hub [Electronic resource], URL: <https://scihub.copernicus.eu/>
16. Cutler M.E.J., Boyd D.S., Foody G.M., Vetrivel A. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: An Assessment of Predictions Between Regions, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, Vol. 70, ID 042032, pp. 66-77.

17. Frampton W.J., Dash J., Watmough G., Milton E.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation, *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, 2013, Vol. 82, pp. 83-92.
18. Gomariz-Castillo F., Alonso-Sarria F., Cánovas-García F. Improving classification accuracy of multi-temporal Landsat images by assessing the use of different algorithms, textural and ancillary information for a Mediterranean semiarid area from 2000 to 2015, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9(10): 1058, pp. 1-23.
19. 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: 1197, pp. 1-24.
20. Helman D.A., Lensky I.M., Tessler N., Osem Y. A phenology-based method for monitoring woody and herbaceous vegetation in Mediterranean forests from NDVI time series, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 9, 12314-12335.
21. Hepinstall-Cymerman J., Coe S., Alberti M. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling, *Remote Sensing*, 2009, No. 1, pp. 1353-1379.
22. Hill M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a North American transect, *Remote sensing of environment*, 2013, Vol. 137, pp. 94-111.
23. Huang H., Roy D.P., Boschetti L., Zhang H.K., Yan L., Kumar S.S. et al. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 10, pp. 873.
24. Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classification in Central Europe, *Remote Sensing*, 2016, No. 8(16), pp. 166-193.
25. Inglada J., Vincent A., Arias M., Tardy B., Morin D., Rodes I. Operational high resolution land cover map production at the country scale using satellite image time series, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9 (1), ID 95.
26. Kupkova L., Cervena L., Sucha R., Jakesova J. Classification of tundra vegetation in the Krkonose Mts. National Park using APEX, AISA Dual and Sentinel-2A data, *European Journal of Remote Sensing*, 2017, Vol. 50, pp. 29-46.
27. Kurbanov E.A., Vorobev O.N., Menshikov S.A., Ali M.S. Tree species classification with Sentinel-2 data in European part of Russia, *Earth observation advancements in a changing world*, 2019, Vol. 1, pp. 33-36
28. Land Cover Classification System [Electronic resource], URL: <http://www.fao.org/3/a-i5232e.pdf>
29. Lattakia agriculture directorate. Forest Fire Management Plan, Lattakia, 2018, pp. 1-48.
30. Laurin G.V., Puletti N., Hawthorne W., Liesenberg V., Corona P., Papale D. et al. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 176, pp. 163-176.
31. Legend of the global CCI-LC maps, based on LCCS [Electronic resource], URL: <https://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer>, 25.12.2019
32. Leinenkugel P., Deck R., Huth J., Ottinger M., Mack B. The potential of open geodata for automated large-scale land use and land cover classification, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 19: ID 2249.
33. Loboda T., Krankina O., Savin I., Kurbanov E., Joanne H. Land Management and the impact of the 2010 extreme drought event on the agricultural and ecological systems of European Russia, *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991*, Eds. G. Gutman, R. Volker, Springer International Publishing, 2017, pp. 173-192.
34. Lu D., Li G., Moran E., Dutra L., Batistella M. The roles of textural images in improving land-cover classification in the Brazilian Amazon, *International Journal of Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, pp. 8188-8207.
35. Meyer L.H., Heurich M., Beudert B., Premier J., Pflugmacher D. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 10, ID: 1160.
36. Mohammady M., Moradi H.R., Zeinivand H., Temme A.J.A.M. A comparison of supervised, unsupervised and synthetic land use classification methods in the north of Iran, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, No. 12, pp. 1515-1526.
37. Puletti N., Chianucci F., Castaldi C. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments, *Annals of Silvicultural Research*, 2018, Vol. 42, No. 1.
38. Rujoiu-Mare M.R., Olariu B., Mihai B.A., Nistor C., Savulescu I. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery, *European Journal of Remote Sensing*, 2017, Vol. 50, pp. 496-508.
39. Zarco-Tejada P.J., Hornero A., Beck P.S.A., Kattenborn T., Kempeneers P., Hernández-Clemente R. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline, *Remote sensing of environment*, 2019, Vol. 223, pp. 320-335.