



Научная статья

УДК 528.88:630*181

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-6-9-32

Спутниковый мониторинг состояния насаждений ели сербской (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская)

Е.В. Дмитриев^{1,2}, канд. физ.-мат. наук, доц., ст. науч. сотр.;

ResearcherID: [E-4794-2014](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5363-3934>

З.В. Говедар^{3,4}, чл.-кор. АНИРС, д-р с.-х. наук, проф.;

ResearcherID: [AAN-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

П.Г. Мельник⁵, канд. с.-х. наук, доц.;

ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

Т.В. Кондранин¹, д-р физ.-мат. наук, проф.;

ResearcherID: [K-9407-2013](https://orcid.org/0000-0003-3565-3194), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3565-3194>

¹Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия, 141701; yegor@mail.ru, kondr@kondr.rector.mipt.ru

²Институт вычислительной математики РАН, ул. Губкина, д. 8, Москва, Россия, 119333; yegor@mail.ru

³Университет Бая-Луки, факультет лесного хозяйства, бульв. Петра Бойовича, д. 1а, г. Бая-Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина, 78000; zoran.govedar@sf.unibl.org

⁴Академия наук и искусств Республики Сербской, бульв. Бана Лазаревича, д. 1, г. Бая-Лука, Республика Сербская, Босния и Герцеговина, 78000; zoran.govedar@sf.unibl.org

⁵Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), ул. 1-я Институтская, д. 1, г. Мытищи, Московская обл., Россия, 141005; melnik_petr@bk.ru

Поступила в редакцию 26.06.24 / Одобрена после рецензирования 10.09.24 / Принята к печати 13.09.24

Аннотация. Мультиспектральные спутниковые изображения среднего пространственного разрешения являются основным источником информации для осуществления дистанционного мониторинга древостоев, включая оценку лесотаксационных и биопродукционных параметров древостоев, а также изменений жизненного состояния видов. Цель данной работы – определение последствий пирогенного воздействия на одну из наиболее крупных популяций сербской ели (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская, 1675 м над ур. м.) с использованием многовременных многоспектральных изображений Sentinel-2. Сербская ель – это реликтовый, исчезающий древесный вид, общая популяция которого значительно сокращается за последние 100 лет. В настоящее время естественное местообитание данного вида ограничивается небольшой территорией на границе Сербии и Боснии и Герцеговины. Для анализа спутниковой информации мы предложили многоэтапный метод, позволяющий выделить популяцию сербской ели на обследуемых землях, определить динамику из-

менения жизненного состояния за последние 10 лет и оценить последствия от лесного пожара, произошедшего в данном районе в 2021 г. Выявлено, что повреждения получило около 50 % площади насаждений сербской ели, причем для 1/2 этих площадей прогнозируется гибель вида. Наибольший ущерб нанесен насаждениям в центральной части северного склона горы Великий Столац. Средние оценки площадей классов повреждений за восстановительный период: здоровые – 17,6 га, ослабленные – 8,4 га, поврежденные – 8,0 га, усыхающие – 1,2 га. Анализ вегетационных индексов показал отсутствие значимых тенденций к естественному возобновлению сербской ели. Изучение изображений за 2024 г. позволяет обоснованно предположить, что начался процесс замещения сербской ели лиственными видами, при этом улучшения жизненного состояния популяции сербской ели не ожидается. Таким образом, для сохранения данной популяции необходимо проведение работ по лесовосстановлению этой ценной реликтовой породы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, распознавание образов, спутниковые изображения, лесные пожары, ель сербская, *Picea omorika* (Panč.) Purk.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 23-29-00128 «Методы машинного обучения в задаче автоматизации обработки данных космических систем высокдетального мониторинга растительного покрова».

Для цитирования: Дмитриев Е.В., Говедар З.В., Мельник П.Г., Кондранин Т.В. Спутниковый мониторинг состояния насаждений ели сербской (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 6. С. 9–32. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-9-32>

Original article

Satellite Monitoring of the State of Serbian Spruce (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) Stands in the Mount Veliki Stolac Area (Republic of Srpska)

Egor V. Dmitriev^{1,2}, Candidate of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Senior Research Scientist; ResearcherID: [E-4794-2014](https://orcid.org/0000-0001-5363-3934), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5363-3934>

Zoran V. Govedar^{3,4}, Corresponding Member of the Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, Doctor of Agriculture, Prof.; ResearcherID: [AAH-6314-2019](https://orcid.org/0000-0001-9791-4113), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9791-4113>

Petr G. Melnik⁵, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-7644-2014](https://orcid.org/0000-0002-2802-7614), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-7614>

Timofey V. Kondranin¹, Doctor of Physics and Mathematics, Prof.; ResearcherID: [K-9407-2013](https://orcid.org/0000-0003-3565-3194), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3565-3194>

¹Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), per. Institutskiy, 9, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russian Federation; yegor@mail.ru, kondr@kondr.ector.mipt.ru

²Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian Academy of Sciences, ul. Gubkina, 8, Moscow, 119333, Russian Federation; yegor@mail.ru

³University of Banja Luka, Faculty of Forestry, blv. Petar Bojovic, 1a, Banja Luka, Republic of Srpska, 78000, Bosnia and Herzegovina; zoran.govedar@sf.unibl.org

⁴Academy of Sciences and Arts of the Republic of Srpska, blv. Ban Lazarevic, 1, Banja Luka, Republic of Srpska, 78000, Bosnia and Herzegovina; zoran.govedar@sf.unibl.org



⁵Bauman Moscow State Technical University (Mytishchi Branch) (National Research University), ul. 1-ya Institutskaya, 1, Mytishchi, Moscow Region, 141005, Russian Federation; melnik_petr@bk.ru[✉]

Received on June 26, 2024 / Approved after reviewing on September 10, 2024 / Accepted on September 13, 2024

Abstract. Multispectral satellite images of medium spatial resolution are the main source of data for remote sensing of stands, including the assessment of forest inventory and biological productivity parameters of stands, as well as changes in the vital status of species. The aim of this work has been to determine the effects of pyrogenic impact on one of the largest populations of Serbian spruce (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) in the Mount Veliki Stolac area (the Republic of Srpska, 1,675 m above sea level) using multi-temporal multispectral Sentinel-2 imagery. Serbian spruce is a relict, endangered tree species whose total population has been declining significantly over the past 100 years. Currently, the natural habitat of this species is limited to a small area on the border of Serbia and Bosnia and Herzegovina. To analyze satellite data, a multi-stage method has been proposed that has allowed identifying the Serbian spruce population in the surveyed areas, determining the dynamics of changes in vital status over the past 10 years, and assessing the effects of the forest fire that occurred in this area in 2021. It has been revealed that approximately 50 % of Serbian spruce stands have been damaged, with the species predicted to die for 1/2 of these areas. The greatest damage has been caused to the stands in the central part of the northern slope of Mount Veliki Stolac. Average estimates of the areas of vital status for the recovery period are: healthy – 17.6 ha, weakened – 8.4 ha, damaged – 8.0 ha, drying out – 1.2 ha. The analysis of vegetation indices has shown the absence of significant trends towards natural regeneration of Serbian spruce. The examination of images for 2024 allows us to reasonably assume that the process of replacing Serbian spruce with deciduous species has begun, while no improvement in the vital status of the Serbian spruce population is expected. Thus, in order to preserve this population, it is necessary to carry out reforestation of this valuable relict species.

Keywords: remote sensing, pattern recognition, satellite imagery, forest fires, Serbian spruce, *Picea omorika* (Panč.) Purk.

Acknowledgements: The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation within the framework of research project no. 23-29-00128 “Machine Learning Methods for Automation of Processing Data from Satellite Systems of Highly Detailed Monitoring of Vegetation Cover”.

For citation: Dmitriev E.V., Govedar Z.V., Melnik P.G., Kondranin T.V. Satellite Monitoring of the State of Serbian Spruce (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) Stands in the Mount Veliki Stolac Area (Republic of Srpska). *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 6, pp. 9–32. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-6-9-32>

Введение

Аэрокосмический мониторинг редких и исчезающих видов деревьев является важнейшей частью реализации государственных программ, направленных на сохранение биоразнообразия лесов [53]. С использованием спутниковой оптической аппаратуры среднего и высокого пространственного разрешения удастся получить оценки временной изменчивости характеристик конкретных популяций, классифицировать жизненное состояние и категорию сохранности рассматриваемого вида [4, 9, 40, 45]. Данные мониторинга также позволяют судить об эффективности управленческих решений и корректировать меропр-

ятия по лесной охране. Анализируя результаты исследований последних лет, можно отметить существенное продвижение работ по созданию полной базы данных инвентаризации растений, расположенных на территории Китайской народной республики, включая оцифровку гербарных образцов и создание банка ДНК [56]. Исследования, посвященные оценке влияния изменений глобального климата на лесные экосистемы, показывают тенденцию к сокращению ареалов произрастания редких видов деревьев, распространенных в горных районах Китая и их постепенное смещение на север [55].

Сохранение биоразнообразия на территории России в первую очередь связано с созданием особо охраняемых природных территорий. Контроль состояния растительного покрова производится на основе данных наземных обследований и аэрокосмической информации. Своевременное обнаружение быстрого снижения численности и сужения ареалов произрастания редких и исчезающих видов деревьев, происходящих вследствие изменения климата, антропогенных выбросов и лесных пожаров, способствует разработке адекватных мер по сохранению и восстановлению лесных популяций [6].

Одним из наиболее важных направлений осуществления контроля является мониторинг лесных пожаров. В результате мониторинга производится обнаружение очагов горения, оценка площади поврежденных насаждений и исследование процесса естественного возобновления лесов [44]. Помимо природных факторов угнетение редких видов растений связывается с рекреационным воздействием [6]. Для поддержания процессов естественного возобновления лесов после пирогенного воздействия большое значение имеет оценка их жизненного состояния. Традиционно определение жизненного состояния древостоев производится в ходе наземных обследований, проведение которых связано со значительными временными затратами [26]. Использование данных спутникового зондирования и соответствующих методов автоматизированной обработки позволяет своевременно актуализировать информацию о состоянии лесных территорий, что имеет особое значение для исчезающих и редких видов деревьев, являющихся важной компонентой лесных экосистем [1, 2].

Хвойные деревья представляют собой самую большую группу голосеменных растений, содержащую около 600 видов и составляющую более 25 % лесов мира [49], однако при этом, в соответствии со статистическими данными Международного союза охраны природы (МСОП), примерно 34 % видов хвойных деревьев находятся под угрозой исчезновения [29]. Причиной являются относительно низкие скорость роста и способность к расселению у хвойных деревьев, что снижает их возможность адаптироваться к быстрым изменениям окружающей среды [39, 50].

В данной работе приводятся результаты мониторинга насаждений сербской ели (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в Республике Сербской с использованием многоспектральных спутниковых изображений среднего пространственного разрешения за последние 10 лет. В настоящее время данный вид занесен в Красную книгу МСОП как находящийся под угрозой исчезновения [10]. Ареал сербской ели не является сплошным, он постепенно сокращается (*area perforata – area фрагментата – area solitaria*) в основном на недоступных, очень крутых склонах. Вид чувствителен к негативным воздействиям биотического и абиотического характера, в связи с чем в последнее время происходит постоянное сокращение его площади произрастания. Основными причинами деградации

данного вида являются изменение погодных условий, поражение вредителями и пирогенное воздействие [30]. Из-за растущей угрозы утраты этого вида были начаты многочисленные мероприятия с целью его сохранения путем содействия естественному возобновлению (*in situ*), т. е. сохранению генетического разнообразия на уровне популяции [33].

Общее увеличение пожарной опасности, наблюдаемое в последнее время в связи с глобальным потеплением климата [48], коснулось и труднодоступных местообитаний ели сербской. Крупные пожары зафиксированы в середине 1946 и 1947 гг., поскольку это были засушливые годы с бездождевым периодом, что привело к уничтожению крупных массивов вида в районе гор Явор и Смрчево Точило [22]. Этот древостой ранее частично погиб вследствие лесного пожара, произошедшего от несоблюдения правил охоты [35]. Пожары и раньше становились причиной сокращения площадей ели и смены ее насаждений насаждениями других видов, особенно в XIX в. [46]. Помимо поражения самих деревьев, лесные пожары приводят к изменению физико-химических и биологических свойств лесных почв. На основе фитоценологических наблюдений проведены непрерывные исследования динамики сукцессии в зоне лесного пожара (природный заповедник «Караула Штула», г. Вишеград) и установлено спонтанное естественное возобновление ели, которая только через 30 лет образует растительные сообщества [16, 17]. Вследствие выгорания гумусовых веществ снижается ферментативная активность и повышается уровень pH лесных почв, что, в свою очередь, влечет изменение видового состава древостоев [54]. Поскольку сербская ель имеет низкую энергию роста по сравнению с видами-конкурентами [42], такими как ель европейская (*Picea abies* (L.) Karst.) и бук лесной (*Fagus sylvatica* L.), в местах гарей происходит постепенное замещение коренного вида и образование смешанных древостоев [11, 14]. Эти и другие изменения состояния насаждений ели сербской могут быть оценены на основе анализа многовременных многоспектральных изображений среднего пространственного разрешения.

Целью работы является определение последствий пирогенного воздействия на одну из наиболее крупных популяций сербской ели (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) в районе горы Великий Столац (Республика Сербская) с использованием многовременных многоспектральных изображений Sentinel-2.

Объекты и методы исследования

Сербская ель, или ель Панчича (*Picea omorika* (Panč.) Purk.) была обнаружена и классифицирована как отдельный вид во второй половине XIX в. в Сербии в районе дер. Заовине [36]. Это один из старейших видов европейских деревьев, происходящих из третичного периода [51]. Исследования ископаемых остатков *Picea omoricoides* показывают, что ранее насаждения вида были довольно распространены и занимали значительные площади в Европе [8, 52]. В дальнейшем произошло существенное сокращение как площади распространения, так и площади обитания данного вида, и в настоящее время ель сербская рассматривается как эндемичный вид Балканского полуострова.

Ареал произрастания сербской ели состоит из 5 участков, из которых 2 наиболее крупных расположены в районе среднего и верхнего течения р. Дрина, протекающей вдоль границы между Республикой Босния и Герцеговина и Республикой Сербия. По современным оценкам площадь распростра-

нения ели сербской составляет около 4000 км². Ареал состоит из 26 изолированных групп различного размера, которые могут содержать как менее 10, так и более 1000 особей. Общая площадь обитания не превышает 200 км². В работе [34] приведено описание 14 крупных естественных мест обитания сербской ели на территории Сербии и Боснии и Герцеговины.

Наиболее крупный участок расположен в районе горного массива Великий Столац, который был выбран в качестве территории исследования (рис. 1). Участок находится в восточной части Боснии и Герцеговины недалеко от р. Дрина на высоте около 1100–1500 м над ур. м. и относится к Столацкому реликтовому сектору Иллирийской провинции [19]. Оценки площади данного местообитания отличаются в различных источниках. По данным [34], площадь составляет 60,8 га, по данным портала EUFGIS ([http://portal.eufgis.org/search/simple/list/details/?tx_wfqbe_pi1\[unit_number\]=BIN00093](http://portal.eufgis.org/search/simple/list/details/?tx_wfqbe_pi1[unit_number]=BIN00093)) – 29,5 га, а по нашим предварительным оценкам – 40,8 га.

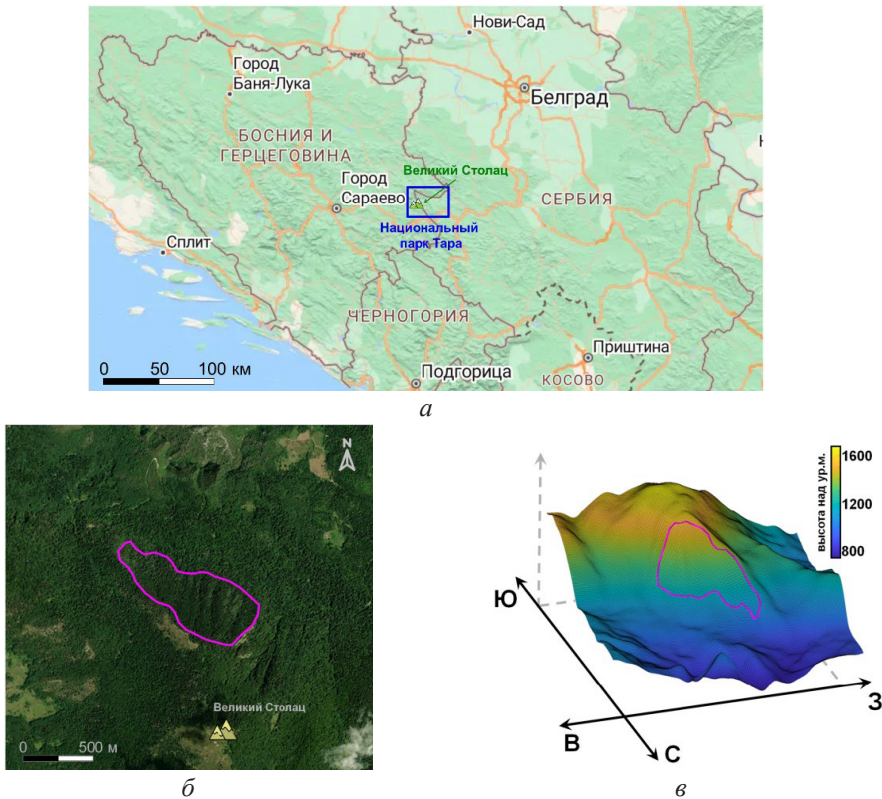


Рис. 1. Популяция ели сербской в районе горы Великий Столац: *а* – местоположение национального парка Тара (Сербия) и горы Великий Столац; *б* – RGB-изображение территории исследования; *в* – цифровая модель рельефа территории исследования (фиолетовым контуром выделен основной ареал обитания ели сербской в данном районе)

Fig. 1. The population of Serbian spruce in the Mount Veliki Stolac area: *a* – location of Tara National Park (Serbia) and Mount Veliki Stolac; *б* – RGB-image of the study area; *в* – digital elevation model of the study area (the purple outline highlights the main habitat of Serbian spruce in this area)

Для данной местности характерно большое количество осадков в весенние и летние месяцы. Среднегодовое количество осадков в период 1961–1990 гг. составляет 1009 мм, а среднее количество осадков за вегетационный период

(с апреля по сентябрь) – 562 мм. Среднегодовая температура воздуха за указанный период равняется 5,9 °С. Средняя температура воздуха за вегетационный период – 11,3 °С. Геологическая основа – известняки среднетриасовой формации, образующие гряды и скальные выступы. Почвенный слой имеет малую или среднюю глубину, без четкой структуры, с вкраплениями известняков. Содержание гумуса колеблется от 10,71 % на глубине 20 см, до 8,83 % на глубине 20–40 см. Реакция почвы кислая на глубине около 15 см.

Насаждения сербской ели расположены на северном склоне между скальными грядами. Ель сербская произрастает на данном участке в смеси с елью европейской. Представленность изучаемого вида в смешении довольно велика и колеблется в пределах 60–80 %, при этом образуются и чистые по составу насаждения. Незадолго до Второй мировой войны в районе горы Великий Столац была проведена инвентаризация насаждений сербской ели. Согласно полученным данным, в рассматриваемом районе насчитывалось около 38 000 взрослых деревьев, часть из которых имела довольно крупные размеры. По современным оценкам популяция сократилась до 10 000 деревьев [34].

Для определения конкретных локаций и состояния насаждений сербской ели на рассматриваемой территории использовались многовременные мультиспектральные изображения Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 и 20 м за период с 2015 по 2024 гг. Относительный номер орбиты для изображений района исследования – 36. Изображения соответствуют уровню обработки L2A – отражательная способность на нижней границе атмосферы. Брали только базовые линии обработки 500 (2015–2020 гг.), 400 (2022 г.), 509 (2023 г.), 510 (до 23 июля 2024 г.) и 511 (после 23 июля 2024 г.), что позволяет рассчитывать на лучшую гармонизацию спектральных характеристик. Для данных продуктов применяются усовершенствованные оценки топографической и атмосферной коррекции, улучшенные алгоритмы распознавания облаков и теней от облаков, выравнивания изображений S2A и S2, вводятся оценки радиометрического смещения каналов.

Для обработки были выбраны изображения, которые не содержат облачности в области размером 2,7×2,5 км, в центре которой находятся насаждения сербской ели. Рассматриваемый ареал произрастания расположен на достаточно крутом склоне, ориентированном на север и северо-восток. Таким образом, в период с октября по март поверхность данного склона будет находиться в ортографической тени, что существенно искажает спектральные характеристики и делает обработку данных за этот промежуток времени практически невозможной.

На начальном этапе для фильтрации проблемных изображений использовалась информация из данных стандартной классификации сцены, которые входят в продукт Sentinel-2 уровня обработки L2A. Стандартная процедура классификации сцены включает в себя 4 целевых класса: растительность, вода, снег и прочие (нерастительные) объекты. Облачность высокой и средней плотности классифицируется достаточно точно, однако с остальными типами помех могут возникать ошибки. На рис. 2 представлены основные типы проблемных изображений, которые фильтровались на основе визуального контроля. Наиболее частой проблемой является появление мозаичной структуры вследствие влияния облачности низкой плотности в верхних слоях атмосферы (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена сцена, где интересующая нас область полностью попадает в тень от горы, при этом после атмосферной и топографической коррек-

ции данные также получают сильно искаженными. На рис 2, в показана сцена с радужной полосой, которая может возникать вследствие влияния аэрозолей. Также могут появляться сцены, в которых стандартный алгоритм классификации не распознает или ошибочно классифицирует тени от облаков (рис. 2, з).

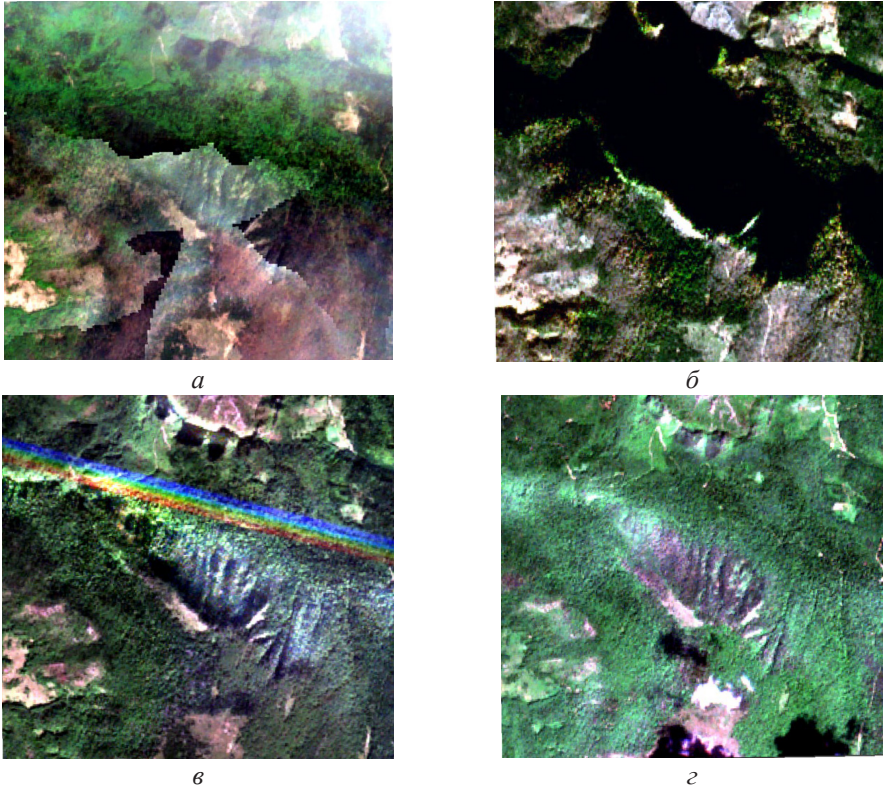


Рис. 2. Примеры проблемных изображений: *а* – влияние перистых облаков (09.05.2020); *б* – орографические тени (20.11.2021); *в* – влияние аэрозолей (27.09.2018); *з* – тени от облаков (27.09.2018)

Fig. 2. The examples of the corrupted images: *a* – influence of cirrus clouds (09.05.2020); *б* – orographic shadows (20.11.2021); *в* – influence of aerosols (27.09.2018); *з* – shadows from clouds (27.09.2018)

Спутниковый мониторинг территории подразумевает решение следующих задач: классификацию основных типов наземных объектов и сегментацию целевого вида деревьев; анализ временной динамики вегетационных индексов целевого вида и прочих объектов растительного покрова в период вегетации; оценку изменения жизненного состояния целевого вида. Схема, характеризующая основные этапы тематической обработки, представлена на рис. 3. Распознавание наземных объектов проводится на основе временных изменений вегетационных индексов с использованием различных алгоритмов обучаемой классификации. Для обучения выделяется период времени, отличающийся отсутствием существенных негативных воздействий природных и антропогенных факторов. В рассматриваемом случае целевым видом является сербская ель. К остальным классам объектов относятся прочие хвойные и лиственные виды деревьев, луговая растительность и открытые почвы. Естественные насаждения ели сербской в фитоценологии подразделяются на 7 экологических сообществ на разных геологических субстратах (известняки, серпентиниты, доломиты и слан-

цы), из которых только одно (на горе Великий Столац) можно отнести к чистым по составу насаждениям [23]. Коренное сообщество ели сербской – *Omorikae–Pineto–Piceeto–Abieto–Fagetum mixtum* [15] имеет многочисленные стадии сукцессии (*Omorikae–Piceeto–Abieto–Fageto–Pinetum-nigrae*, *Omorikae–Piceeto–Abieto–Fageto–Ostryeto–Pinetum nigrae*, *Omorikae–Piceeto–Abieto–Fagetum mixtum*, *Omorikae Piceeto–Abieto–Fageto–Pinetum nigrae*, *Omorikae Piceeto–Abieto–Fageto–Pinetum mixtum*, *Omorikae–Piceeto–Abieto–Fageto–Alnetum mixtum*). Хвойные породы представлены преимущественно елью европейской (*Picea abies* (L.) Karst.) с небольшим участием пихты белой, или европейской (*Abies alba* L.) и сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Из лиственных пород деревьев, образующих сообщества с елью сербской, главным образом представлены бук лесной (*Fagus sylvatica* L.), клен ложноплатановый (*Acer pseudoplatanus* L.), береза повислая (*Betula pendula* Roth.), осина (*Populus tremula* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) и другие виды деревьев. Специфичным является сообщество на торфяных почвах с ольхой черной (*Alnus glutinosae* (L.) Gaertn.).



Рис. 3. Основные этапы тематической обработки многовременных изображений Sentinel-2

Fig. 3. The main stages of thematic processing of Sentinel-2 multi-temporal images

В качестве спектральных признаков, используемых для классификации растительного покрова, применялись вегетационные индексы (ВИ), характеризующие фотосинтетическую активность. Для вычисления ВИ брали данные спектральных каналов Sentinel-2 с разрешением 10 и 20 м. Обозначения каналов имеют вид Bxx (B – band, xx – номер из 2 цифр) в соответствии с документацией продукта S2L (<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-12a/>). Основные пространственные и спектральные характеристики используемых каналов спутниковой аппаратуры Sentinel-2A (S2A) и Sentinel-2B (S2B) представлены в табл. 1. При вычислении ВИ-каналы с разрешением 20 м масштабировались к разрешению 10 м с помощью линейной интерполяции.

Таблица 1

Характеристики используемых каналов спутниковой системы Sentinel-2
The characteristics of the Sentinel-2 satellite system spectral bands used in the study

Канал	Пространственное разрешение, м	S2A		S2B	
		длина волны, нм	полуширина, нм	длина волны, нм	полуширина, нм
B03	10	559,8	36	559,0	36
B04	10	664,6	31	665,0	31
B05	20	704,1	15	703,8	16
B08	10	832,8	106	833,0	106
B11	20	1613,7	91	1610,4	94
B12	20	2202,4	175	2185,7	185

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) характеризует биомассу органов фотосинтетической деятельности растений [38]:

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}.$$

Относительный индекс ClGreen (Green Chlorophyll Index)

$$ClGreen = \frac{B08}{B03} - 1$$

является показателем концентрации хлорофиллов *a* и *b* в листьях растений [25]. Нормализованный разностный индекс красного края NDRE (Normalized Difference Red Edge Index)

$$NDRE = \frac{B08 - B05}{B08 + B05}$$

также связан с концентрацией хлорофиллов и косвенным образом характеризует поглощение азота. Индекс NDRE – хороший индикатор изменения жизненного состояния растений [12].

Перечисленные индексы в различной степени чувствительны к изменениям состояния внутренней структуры тканей листа и концентрации пигментов. Отражение листьями солнечного излучения в видимом ближнем инфракрасном диапазоне происходит в первую очередь за счет полного внутреннего отражения тканями губчатого мезофилла, который благодаря развитой системе межклетников обладает большой внутренней поверхностью [32]. Подтверждением этого служат результаты измерения отражательной способности белой и зеленой частей листа пестролистной герани. Инфильтрация воды в межклеточное пространство приводит к резкому снижению отражательной способности, поскольку при заполнении воздушных полостей происходит уменьшение отражающей поверхности и соответствующие внутренние структуры начинают образовывать непрерывную среду.

В видимом диапазоне при многократном прохождении света через клетки паренхимы листовой пластины его интенсивно поглощают различные пигменты: хлорофиллы, каротиноиды и антоцианы. Максимум поглощения соответствует длинам волн менее 400–500 нм, однако канал B02 данного диапазона считается неинформативным, поскольку поглощение производится как

хлорофиллами, так и каротиноидами. Более высокая отражательная способность листьев в зеленой области спектра (канал B03) обусловлена снижением поглощения хлорофиллами и каротиноидами, однако при этом увеличивается поглощение антоцианами. В красной области спектра (канал B04) происходит интенсивное поглощение хлорофиллом, а в ближнем инфракрасном диапазоне (канал B08) лучи пропускают все перечисленные пигменты.

Проблема использования индекса NDVI при оценке содержания хлорофилла в листьях растений возникает в связи с тем, что насыщение поглощения наблюдается уже при относительно небольших концентрациях данного пигмента [41]. Одно из решений данной проблемы состоит в использовании канала красного края (B05). Излучение данного диапазона гораздо глубже проникает в ткани листа, что обеспечивает достаточную чувствительность индекса NDRE к изменениям концентрации хлорофилла также на средней и поздней стадиях развития листы [13].

При понижении концентрации хлорофилла яркость в канале B03 возрастает за счет ослабления поглощения, при этом яркость в канале B08 остается без ощутимых изменений. Таким образом, существует положительная обратная связь между значением CIGreen и концентрацией хлорофилла. Результаты экспериментов, представленные в [25], показывают, что данная зависимость может быть проиллюстрирована линейной функцией.

Важным фактором, влияющим на точность картирования основных типов объектов при помощи описанных вегетационных индексов, является выбор алгоритма классификации. Мы рассмотрели 3 нелинейных алгоритма обучаемой классификации, обладающих различной точностью и вычислительной эффективностью: метод самокорректирующихся кодов (ECOC), оптимизированный метод к ближайших соседей (KNN) и полносвязную нейронную сеть (FCNN). Метод самокорректирующихся кодов является ансамблевым алгоритмом классификации, который позволяет решать задачу многоклассовой классификации с использованием серии бинарных классификаций [18]. В качестве базового бинарного классификатора использовался метод опорных векторов с гауссовским ядром [47].

Метод к ближайших соседей является универсальным метрическим классификатором, который формирует достаточно сложные дискриминантные поверхности [27]. В классическом виде данный метод имеет низкую вычислительную эффективность, однако в нашей работе применяется быстрая модификация KNN с оптимизированным поиском на основе kd-деревьев [28]. Полносвязные глубокие нейронные сети прямого распространения являются «универсальными аппроксиматорами» и составляют основу для построения более гибких алгоритмов обучаемой классификации [7]. Используемый в этой работе классификатор FCNN имеет 2 скрытых слоя с функциями активации ReLU и Softmax. Проведенные нами тестовые эксперименты на искусственных данных, полученных с помощью статистического моделирования, показали, что для наиболее сложных случаев FCNN характеризуется наибольшей точностью среди рассмотренных методов.

Проблемой, свойственной процессу обработки многовременных мультиспектральных изображений, является избыточность информации. Для выбора используемых периодов съемки брали информацию о характерных датах наступления фенологических событий для данной территории на различных высотах. В целях оптимизации признаков применялся регуляризованный метод

последовательного отбора [20], который позволяет получить последовательность наиболее информативных признаков, устойчивую к малым возмущениям обучающего множества.

Анализ неопределенности классификации состоит в оценке стандартных характеристик точности используемых методов и выделении областей, для которых различные методы дают различные результаты. Стандартные характеристики ошибки классификации рассчитываются на основе матрицы ошибок (CV – confusion matrix) с применением переклассификации и кросс-валидации [21, 27]. Основной характеристикой является полная вероятность ошибки (TE – total error), которая представляет собой отношение ошибочно классифицированных пикселей к общему количеству пикселей. Также вычисляются средние значения ошибок оmissии (TOE – total omission error) и комиссии (TCE – total commission error), которые соответственно характеризуют вероятность ошибочной классификации фактических классов и ответов классификатора.

Для установления классов жизненного состояния дополнительно к описанным вегетационным индексам использовались нормализованный разностный индекс определения гарей (NBR – Normalized Burn Ratio) и нормализованный разностный индекс влажности (NDMI). Для изображений Sentinel-2 индекс NBR вычисляется по формуле

$$NBR = \frac{B08 - B12}{B08 + B12},$$

и применяется для определения зон, получивших наибольшие повреждения от пожара [31]. Области свежих гарей после верхового пожара имеют низкую отражательную способность в БИК-диапазоне и высокую отражательную способность в коротковолновом ИК-диапазоне, что полностью противоположно отражательной способности здоровой растительности. Для выявления выгоревших областей и оценки уровня ущерба от пожара обычно применяют спектрально-временной индекс

$$\Delta NBR = \text{PrefireNBR} - \text{PostfireNBR},$$

который показывает изменение NBR непосредственно до и после пожара. В частности, такой подход позволяет отличить гари от открытых участков черных почв, которые имеют схожие значения NBR.

Еще одной проблемой, возникающей вследствие пирогенного воздействия на лесные насаждения, в особенности на хвойные виды, является наличие дефицита воды в зеленых фитоэлементах. Для определения уровня водного стресса используется нормализованный разностный индекс влаги (NDMI – Normalized Difference Moisture Index). Изначально данный индекс был введен в работе [24] как нормализованная разность отражательной способности при длинах волн 860 и 1240 нм. Однако в дальнейших исследованиях, например в [43], канал коротковолнового ИК-диапазона был смещен в область 1600 нм, таким образом, для данных Sentinel-2 NDMI вычисляется по формуле

$$NDMI = \frac{B08 - B11}{B08 + B11}.$$

Для оценки жизненного состояния древостоев обычно используют дискретные характеристики (классы жизненного состояния), которые определяются по набору показателей поражения отдельных деревьев. Так, при установлении жизненного состояния лесов Московской области М.Е. Кобельков и др. [3]

ввели 6 категорий деревьев: здоровые (без признаков ослабления), ослабленные, сильно ослабленные, усыхающие, свежий и старый сухостой. В дальнейшем при исследовании поражения сибирских лесов уссурийским полиграфом С.А. Кривец и др. [5] предложили шкалу категорий состояния деревьев пихты сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.).

Для наиболее точного описания жизненного состояния необходимо использовать изображения сверхвысокого пространственного разрешения (например, изображения с БПЛА), которые позволяют фиксировать изменения на уровне кроны отдельных деревьев. В нашем случае элемент разрешения Sentinel-2 характеризует отражательную способность группы деревьев, следовательно, мы не можем определить изменения структуры кроны отдельных деревьев и должны ориентироваться на референсные значения вегетационных индексов. Общая схема алгоритма определения классов жизненного состояния приведена на рис. 4.

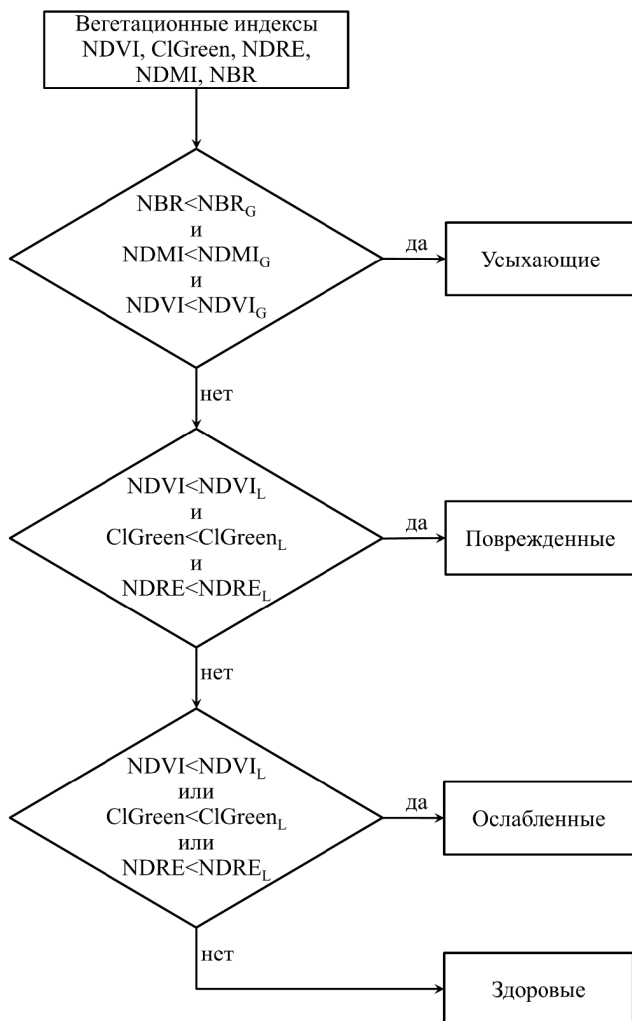


Рис. 4. Алгоритм классификации жизненного состояния по глобальным и локальным пороговым значениям вегетационных индексов

Fig. 4. The vital status classification algorithm based on global and local thresholds of vegetation indices

Для оценки жизненного состояния сербской ели мы вводим 4 класса: здоровые, ослабленные, поврежденные и усыхающие. В нашем случае к классу усыхающих также относятся и различные виды сухостоя [5]. Мы рассматриваем 2 типа референсных значений вегетационных индексов: глобальные (VI_G) и локальные (VI_L). Глобальные соответствуют общепринятым пороговым значениям вегетационных индексов, по которым выделяются области высокой степени угнетения растительного покрова. К усыхающим мы отнесли пиксели, для которых индексы NBR, NDMI и NDVI не превышают соответствующих глобальных пороговых значений NBR_G , $NDMI_G$ и $NDVI_G$. В качестве локальных референсных значений мы использовали процентные точки (от 1 до 5 %) распределения вегетационных индексов для целевого объекта на изучаемой территории. Пиксели, не относящиеся к классу усыхающих, для которых все значения NDVI, CI_{Green} и NDRE меньше соответствующих локальных референсных значений $NDVI_L$, CI_{Green}_L и $NDRE_L$, мы классифицировали как поврежденные. Пиксель относится к классу здоровых, если все значения NDVI, CI_{Green} и NDRE больше или равны соответствующим $NDVI_L$, CI_{Green}_L и $NDRE_L$. В противном случае пиксель входит в класс ослабленных.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты сегментации объектов на различных этапах тематической обработки представлены на рис. 5. Для построения маски вечнозеленых пород деревьев (рис. 5, б) оказалось достаточным использовать только значения NDVI, рассчитываемые по изображениям в осенний и весенний периоды. Поскольку обследуемая территория обладает сложной орографией, фенологические изменения листопадных видов деревьев и луговой растительности происходят в различные даты в зависимости от высоты над уровнем моря. При использовании изображений за 22.10.2019, 20.03.2020 и 09.04.2020 для всех 3 рассматриваемых алгоритмов классификации (SVM, ECOC и FCNN) точность кросс-валидации составила 100 %. Данную точность можно получить и для некоторых других комбинаций изображений, однако указанной комбинации соответствовало минимальное различие между результатами классификации различными методами. Таким образом, для 4 % пикселей, относящихся к маске вечнозеленых видов (цветные пиксели на рис. 5, б), наблюдалась неопределенность ответов классификаторов.

Для более тонкой классификации на последующих этапах дополнительно к NDVI мы также использовали индексы CI_{Green} и NDRE. При построении масок лиственных видов, луговой растительности и открытых почв (рис. 5, г) наиболее информативными оказались сентябрьские снимки за 2015 и 2018 гг. На основе метода повторных выборок были рассчитаны доверительные интервалы для оценок полной вероятности ошибок (табл. 2). Для алгоритма FCNN полная вероятность ошибки составила в среднем несколько меньшую величину, чем для алгоритмов KNN и ECOC, однако, поскольку доверительные интервалы имеют существенное перекрытие, данное значение не является статистически значимым. Различие между оценками кросс-валидации для ошибок ТОЕ и ТСЕ не превышало 1 %, что свидетельствует о сбалансированности обучающих данных. Разница между методами наблюдалась для 14 % пикселей.

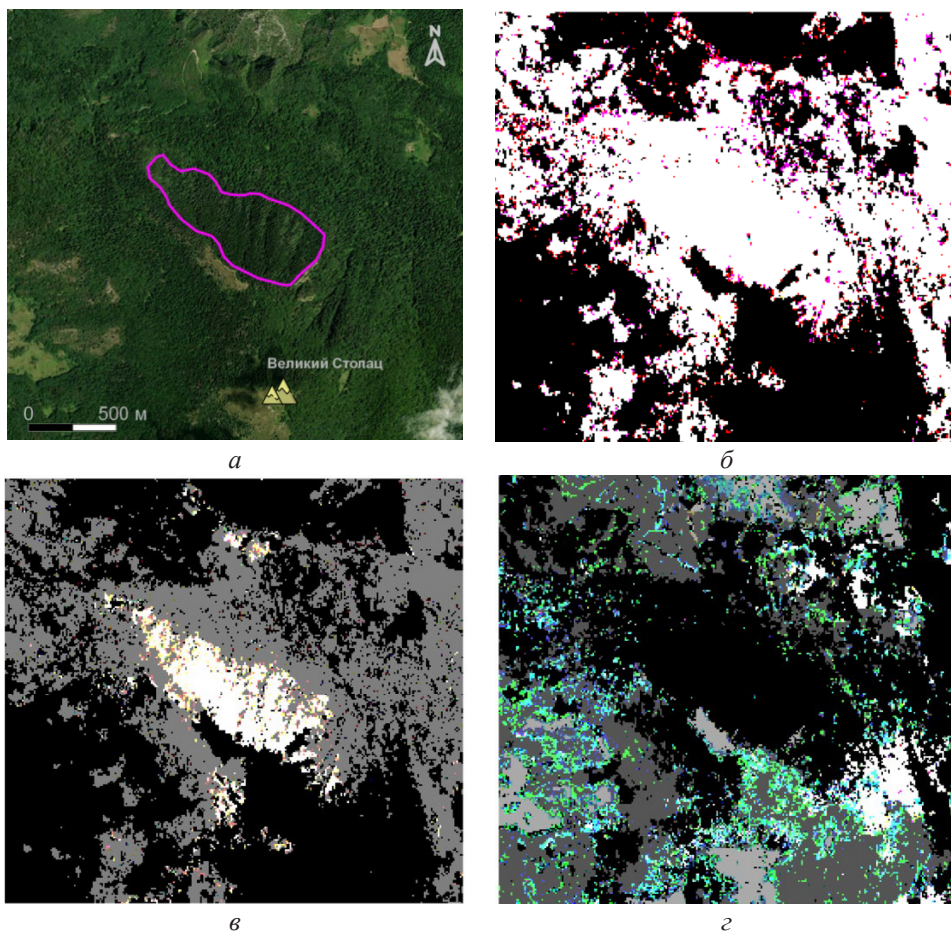


Рис. 5. Маски распознаваемых объектов на различных этапах алгоритма сегментации многовременных изображений Sentinel-2: *а* – RGB-изображение района исследования; *б* – маска вечнозеленых древостоев (белый); *в* – маски хвойных древостоев (белый – ель сербская, серый – ель европейская); *г* – маски прочих объектов (темно серый – лиственные, светло серый – почва и травянистые, белый – смешанные древостои). Цветные пиксели характеризуют различия результатов классификации с помощью рассматриваемых алгоритмов

Fig. 5. The masks of the objects recognized at different stages of the Sentinel-2 multi-temporal image segmentation algorithm: *a* – RGB-image of the study area; *б* – mask of evergreen stands (white); *в* – masks of coniferous stands (white – Serbian spruce, grey – European spruce); *г* – masks of other objects (dark grey – deciduous, light gray – soil and grass, white – mixed stands). The coloured pixels characterize the differences in classification results using the algorithms under consideration

Таблица 2

Доверительные интервалы оценки полной вероятности ошибки классификации основных типов объектов различными методами (%)

The confidence intervals of the total classification error for the main object types recognized by different methods (%)

Тип объекта	FCNN	KNN	ECOC
Лиственные, смешанные леса, луга и почвы	0,2–0,9	0,5–1,2	0,2–1,2
Хвойные	0,5–1,6	0,6–1,2	0,6–1,2

При построении масок хвойных видов (рис. 5, в), наибольшую точность удалось достичь при использовании июльских снимков за 2015 и 2020 гг. В данном случае алгоритм FCNN показал несколько худший результат, однако ухудшение оказалось незначимым. Неопределенность результатов в случае применения различных алгоритмов составила всего 2 % и соответствующие пиксели лежат в большей части на границе маски сербской ели.

Результат сегментации основных типов объектов района исследования представлен на рис. 6. Большая часть территории соответствует однородным хвойным и лиственным насаждениям. Общая площадь насаждений сербской ели, по нашим оценкам, до 2020 г. включительно составляла 35,2 га. Пиксели, для которых наблюдалась неопределенность результатов классификации (класс неопределенных на рис. 6), были исключены из рассмотрения как при оценке площадей распознаваемых объектов, так и при анализе динамики вегетационных индексов. Естественная погрешность площади целевого вида не превышает 1,2 га.

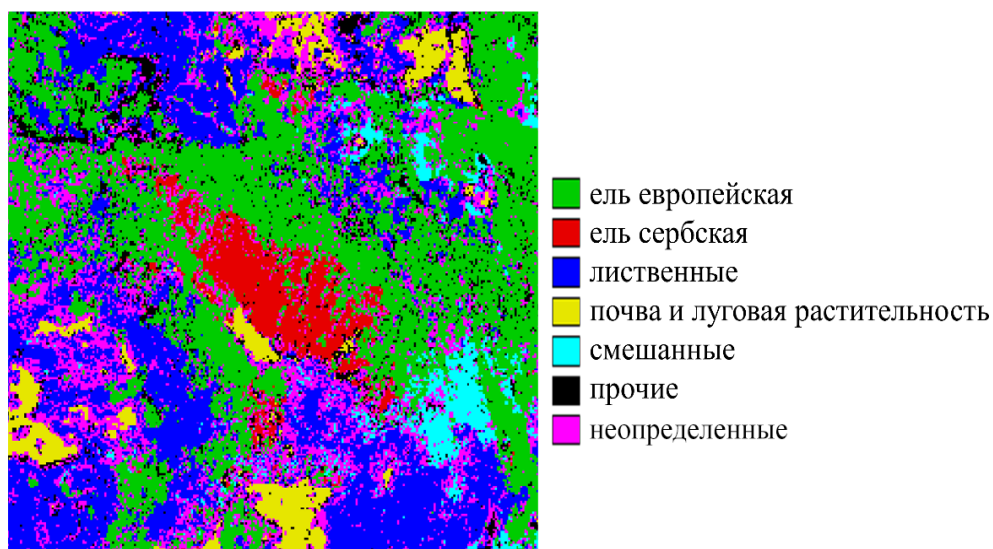


Рис. 6. Результат сегментации основных типов объектов района исследования

Fig. 6. The result of segmentation of the main types of objects in the study area

Летом 2021 г. северный склон горы Великий Столац был охвачен лесным пожаром, в ходе которого пострадала значительная часть насаждений сербской ели. Начало пожара было зафиксировано 27 июля. Его большая часть протекала по низовому типу с различной степенью интенсивности. В августе 2021 г. инициированы мероприятия по тушению пожара, которые успешно завершились 6 сентября. Таким образом, для проведения анализа годовой динамики вегетационных индексов данные наблюдений были разделены по 3 периодам: нормальный – 2015–2020 гг. (до пожара), пирогенный – 2021 г. (год пожара) и восстановительный – 2022–2024 гг. (после пожара). Результаты представлены на рис. 7. Точечные данные по указанным периодам обозначены соответственно крестами, ромбами и кругами. Сплошные линии являются регрессионными моделями на основе гауссовских процессов [37], построены по точечным данным соответствующего цвета.

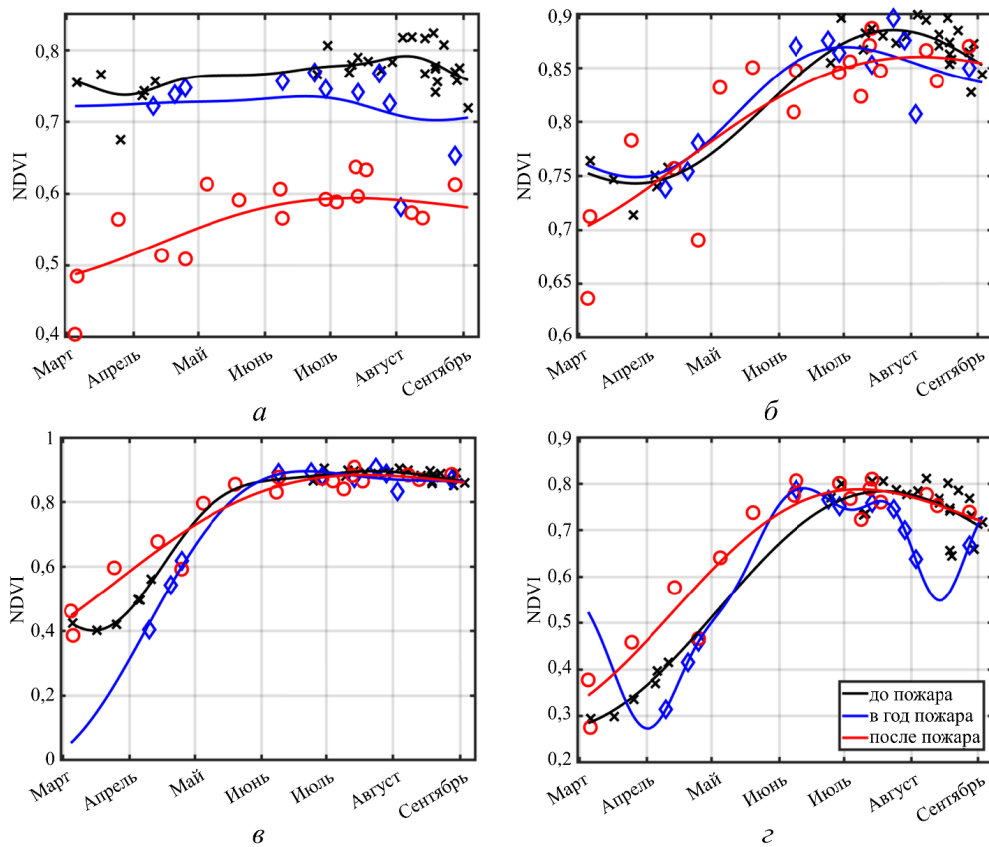


Рис. 7. Годовая динамика среднего индекса NDVI для основных типов объектов по 3 периодам: *а* – ель сербская; *б* – ель европейская; *в* – лиственные; *г* – луговая растительность

Fig. 7. The annual dynamics of the average NDVI across the main object types over 3 time periods: *a* – Serbian spruce; *б* – Norway spruce; *в* – deciduous species; *г* – meadow vegetation

Как можно видеть на рис. 7, *а*, сербская ель не имеет значимых годовых изменений NDVI в нормальный период. Характерные значения данного индекса составляют 0,75–0,8. В пирогенный период NDVI также остается на уровне 0,75 вплоть до июля. В августе вследствие пожара происходит резкое снижение NDVI до 0,6, которое сохраняется в течение восстановительного периода.

Насаждениям ели европейской (рис. 7, *б*) соответствуют несколько большие средние значения NDVI, которые изменяются от 0,75 в марте и апреле до 0,85 с июня по сентябрь. Наиболее выраженную годовую динамику среднего значения NDVI имеют лиственные древостой и луговая растительность (рис. 7, *в*, *г*). В конце марта и начале апреля листва отсутствует, таким образом, лугам соответствуют средние показатели NDVI порядка 0,3, а лиственным древостоям – порядка 0,4. Несколько большие NDVI для лиственных древостоев объясняются наличием незначительных примесей ели европейской и пихты белой, которых, тем не менее, было недостаточно для отнесения соответствующих участков к древостоям смешанного типа. В период с июня по сентябрь лиственным древостоям характерны стабильные значения NDVI около 0,85–0,9, а луговой растительности – 0,75–0,8.

Для всех классов, за исключением сербской ели, регрессионные модели в нормальный, пирогенный и восстановительный периоды практически совпадают. Некоторое различие регрессионных моделей для луговой растительности объясняется большей чувствительностью к засухам. Так, например, для пирогенного периода на рис. 7, *г* можно наблюдать видимое снижение NDVI в августе. Для насаждений сербской ели в восстановительный период характер регрессионной модели NDVI меняется – появляется годовой ход от 0,5 до 0,6, который объясняется появлением луговой и кустарниковой растительности на выгоревших участках. Также для данного объекта увеличивается разброс данных по сравнению с нормальным периодом.

Глобальные пороговые значения индексов NBR, NDMI и NDVI были приняты равными 0, -0,1 и 0,35 соответственно. Данные значения вегетационных индексов характеризуют древостои с полным пожелтением или отсутствием листвы, испытывающие сильный водный стресс. Диапазоны локальных пороговых значений приведены в табл. 3. В данной работе для оценки повреждений мы использовали 1%-е пороговые значения, что соответствует наиболее оптимистичному сценарию.

Таблица 3

**Локальные пороговые значения вегетационных индексов
для насаждений сербской ели**
The local thresholds of vegetation indices for Serbian spruce stands

Индекс	Процентиль 5 %	Процентиль 1 %
NDVI	0,67	0,56
CIGreen	2,8	2,2
NDRE	0,40	0,29
NBR	0,43	0,28
NDMI	0,15	0,03

Первоначальные повреждения от пожара оценивались по индексу Δ NBR, для расчета которого использовались изображения, сделанные непосредственно до начала и сразу после окончания пожара (08.07.2021 и 11.09.2021 соответственно). Средний и высокий уровень повреждений маркируется пикселями, для которых Δ NBR > 0,27. Такие повреждения, как правило, являются последствиями верхового пожара. Таким образом, по нашим оценкам, в 2021 г. полностью выгорело около 1 га насаждений сербской ели. Последствия низового пожара характеризуются значениями $0,27 \geq \Delta$ NBR > 0,1. Соответствующие повреждения получили насаждения на площади 6,5 га (без повреждений – 27,7 га).

Для отнесения насаждений сербской ели к классам по степени повреждения в восстановительный период были выбраны изображения 17 насаждений с минимальными искажениями спектральных характеристик. Оценки площадей, соответствующих классам повреждений, существенно варьируют, характерные изменения – 20–40 % от среднего. В целом за восстановительный период не выявлено значимых трендов, свидетельствующих о положительной или отрицательной динамике восстановления растительного покрова (рис. 8). Средние оценки площадей классов повреждений за восстановительный период следующие: здоровые – 17,6 га; ослабленные – 8,4 га; поврежденные – 8,0 га; усыхающие – 1,2 га. Итак, около 40 % насаждений сербской ели получили серьезные повреждения.

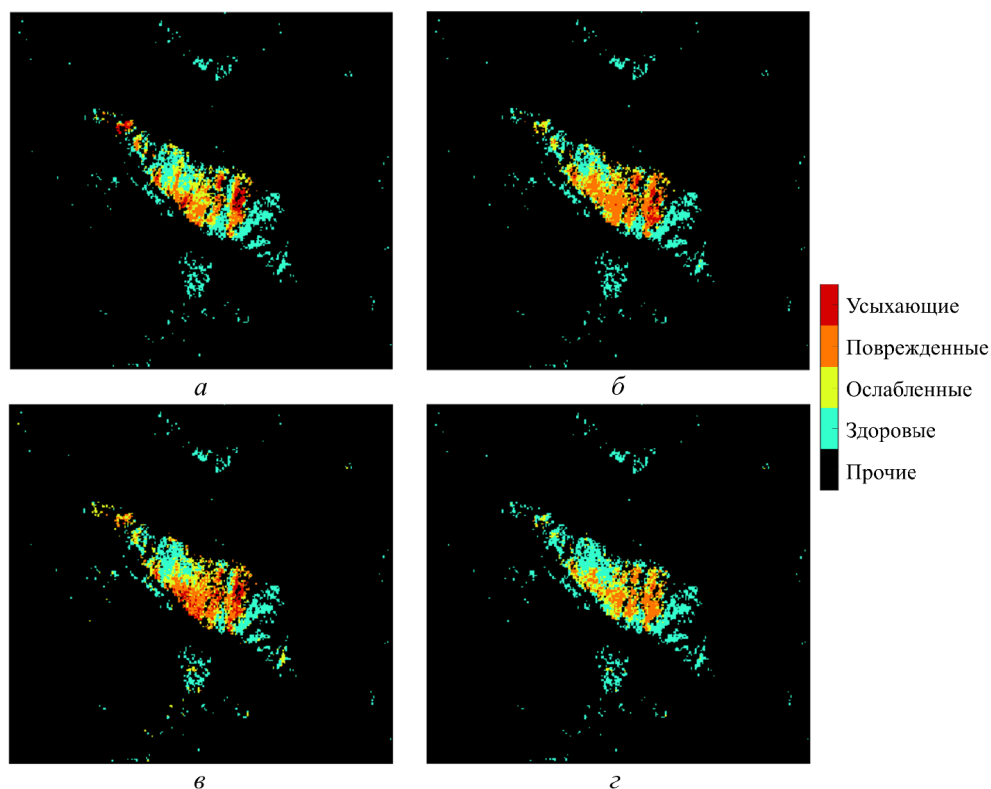


Рис. 8. Результаты классификации жизненного состояния древостоев на участках обитания сербской ели в районе горы Великий Столац за различные даты в течение 3-летнего периода после тушения пожара: *а* – 18.07.2022; *б* – 28.07.2023; *в* – 08.04.2024; *г* – 27.07.2024

Fig. 8. The results of the classification of stands' vital status in the areas inhabited by Serbian spruce located in the Mount Veliki Stolac area for different dates over a 3-year period after fire extinguishing: *a* – 18.07.2022; *б* – 28.07.2023; *в* – 08.04.2024; *г* – 27.07.2024

В течение первых 2 лет после пожара изменения классов жизненного состояния носят случайный характер. Например, для июльских снимков за 2022 и 2023 гг. можно наблюдать изменения классов повреждения на 1–2 га. При этом основное местоположение района, наиболее пострадавшего от пожара, сохраняется. Изменения такого рода объясняются в первую очередь погрешностями атмосферной и топографической коррекции.

Для 2024 г. наблюдается повышение уровня состояния древостоев на выбранном участке в летние месяцы по сравнению с весенним периодом. Это хорошо заметно по изображениям на рис. 8 за апрель и июль 2024 г. Данный эффект объясняется началом замещения насаждений сербской ели наиболее поврежденных участков лиственным подростом и кустарниковой растительностью. Насаждения сербской ели в восточной и западной частях склона горы Великий Столац относятся к классу здоровых для всех изображений восстановительного периода, таким образом, можно считать, что они не получили повреждений вследствие пожара. Однако, учитывая локальную орографию (сохранившиеся насаждения отделены ущельями от наиболее поврежденной области), а также низкую энергию роста сербской ели по

сравнению с местными лиственными видами, мы не можем рассчитывать на естественное лесовозобновление популяции сербской ели в данном районе. Таким образом, для сохранения популяции данного исчезающего реликтового вида рекомендуется проведение специальных лесовосстановительных мероприятий.

Заключение

Представленный метод тематической обработки многовременных много-спектральных изображений среднего пространственного разрешения является эффективным инструментом дистанционного мониторинга изменений жизненного состояния древостоев, в т. ч. редких и исчезающих видов деревьев. Приведено обоснование выбора используемых вегетационных индексов, дат съемки и расчета пороговых значений спектральных характеристик. Результаты обработки с помощью данного метода спутниковых изображений Sentinel-2 (L2A) за последние 10 лет позволили оценить диапазоны спектральных характеристик здоровых насаждений сербской ели, а также повреждения и динамику восстановления вида в районе горы Великий Столац (Республика Сербская) после пирогенного воздействия в 2021 г.

По итоговым оценкам, 3 % от общей площади насаждений сербской ели было уничтожено верховым пожаром и 18,5 % получило первичные повреждения. Анализ спутниковых данных за последующие 3 года показал, что в реальности низовой пожар затронул гораздо большую область – около 50 % территории насаждений сербской ели. Зоной наибольшего поражения популяции сербской ели является центральная часть северного склона горы Великий Столац. Около 26 % насаждений имели сильные повреждения, которые, скорее всего, приведут к гибели особей. К классу ослабленных можно отнести 24 % общей площади насаждений. Для данных участков возможно естественное восстановление.

Анализ спутниковых изображений за 2024 г. позволяет обоснованно предположить, что в настоящее время начался процесс заселения территорий, поврежденных лесным пожаром, лиственными видами, при этом значимых тенденций к улучшению жизненного состояния популяции сербской ели не наблюдается. Таким образом, для сохранения популяции необходимо проведение работ по лесовосстановлению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Дмитриев Е.В., Козуб В.А., Мельник П.Г., Соколов А.А., Сафонова А.Н. Классификация и оценка состояния смешанных древостоев по аэроизображениям сверхвысокого пространственного разрешения // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. № 5. С. 9–24.

Dmitriev E.V., Kozub V.A., Melnik P.G., Sokolov A.A., Safonova A.N. Classification and Assessment of the State of Mixed Forests from Very High Spatial Resolution Airborne Images. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2019, no. 5, pp. 9–24. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.9>

2. Дмитриев Е.В., Мельник П.Г., Донской С.А., Кондранин Т.В. Повышение эффективности текстурной сегментации лесного полога по изображениям сверхвысокого пространственного разрешения // Лесн. вестн. / Forestry Bulletin. 2023. Т. 27, № 5. С. 25–36.

Dmitriev Y.V., Melnik P.G., Donskoy S.A., Kondranin T.V. Improving Efficiency of Tree Canopy Texture Segmentation by Using Very High Spatial Resolution Satellite Images. *Lesnoy vestnik = Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 5, pp. 25–36. (In Russ.).

<https://doi.org/10.18698/2542-1468-2023-5-25-36>

3. Кобельков М.Е., Чуканов М.А., Хотин Д.В. Категории состояния основных лесообразующих пород Московской области. М., 2000. 40 с.

Kobel'kov M.E., Chukanov M.A., Khotin D.V. *Condition Categories of the Main Forest-Forming Species in the Moscow Region*. Moscow, 2000. 40 p. (In Russ.).

4. Коломыц Э.Г., Севостьянов С.М. Ландшафтно-экологическая стратегия геосистемного мониторинга лесов в условиях современного потепления // Проблемы региональной экологии. 2022. № 4. С. 39–47.

Kolomyts E.G., Sevost'yanov S.M. Landscape-Ecological Strategy for Forest Geosystem Monitoring under the Conditions of Modern Warming. *Problemy regionalnoj ekologii = Regional Environmental Issues*, 2022, no. 4, pp. 39–47. (In Russ.).

<https://doi.org/10.24412/1728-323X-2022-4-39-47>

5. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Пашенова Н.В., Демидко Д.А., Пет'ко В.М., Баранчиков Ю.Н. Усурийский полиграф в лесах Сибири (распространение, биология, экология, выявление и обследование поврежденных насаждений): метод. пособие. Томск; Красноярск, 2015. 48 с.

Krivets S.A., Kerchev I.A., Bisirova E.M., Pashenova N.V., Demidko D.A., Pet'ko V.M., Baranchikov Yu.N. *Four-Eyed Fir Bark Beetle in Siberian Forests (Distribution, Biology, Ecology, Detection and Survey of Damaged Stands): Study Guide*. Tomsk, Krasnoyarsk, 2015. 48 p. (In Russ.).

6. Лазарева А.А., Слаута А.А., Афонина Т.Е. Мониторинг геосистем особо охраняемых природных территорий в условиях антропогенной нагрузки // Наука. Инновации. Технологии. 2019. № 1. С. 35–46.

Lazareva A.A., Slauta A.A., Afonina T.E. Monitoring Geosystems of Specially Protected Natural Territories in the Conditions of Anthropogenous Load. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii = Science. Innovations. Technologies*, 2019, no. 1, pp. 35–46. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37495/2308-4758-2019-1-35-46>

7. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 343 с.

Osovskij S. *Neural Networks for Information Processing*. Trans. from Pol. by I.D. Rudinskij. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2004. 343 p. (In Russ.).

8. Adamović L. *Die Vegetationsverhältnisse der Balkanländer (Mösische Länder): umfassend Serbien, Altserbien, Bulgarien, Ostrumelien, Nordthrakien und Nordmazedonien*. Leipzig, Engelmann Verlag, 1909. 567 p. (In Germ.).

9. Adjognon G.S., Rivera-Ballesteros A., van Soest D. Satellite-Based Tree Cover Mapping for Forest Conservation in the Drylands of Sub Saharan Africa (SSA): Application to Burkina Faso GAZETTED Forests. *Development Engineering*, 2019, vol. 4, art. no. 100039. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2018.100039>

10. Aleksić J.M., Ballian D., Isajev D., Mataruga M., Christian T., Gardner M. *Picea omorika*. *The IUCN Red List of Threatened Species*, 2017. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-2.RLTS.T30313A84039544.en>

11. Ballian D. Kontrola podrijetla Pančičeve omorike (*Picea omorika* Panč./ Purk.) iz plantaže kod Kaknja pomoću izoenzimskih biljega. *Šumarski list*, 2006, vol. 130, no. 7–8, pp. 295–304. (In Serb.).

12. Barnes E.M., Clarke T.R., Richards S.E., Colaizzi P.D., Haberland J., Kostrzewski M., Waller P., Choi C., Riley E., Thompson T., Lascano R.J., Li H., Moran M.S. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data. *Proceedings of the Fifth International Conference on Precision Agriculture*. USA, Minnesota, Bloomington, 2000. 15 p.

13. Boiarskii B., Hasegawa H. Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, 2019, spec. iss. no. 4, pp. 20–29.
<https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
14. Burschel P. Die Omorikafichte. *Forstarchiv*, 1965, vol. 36, pp. 113–131. (In Germ.).
15. Čolić D. Porijeklo i sukcesija šumskih zajednica sa Pančićevo omorikom (*Picea omorika* Panč.) na planini Tari. *Zaštita prirode*, 1965, vol. 29–30, pp. 65–90. (In Serb.).
16. Čolić D. Požar kao ekološki faktor u sukcesiji zajednica Pančićeve omorike i redukovanju njenog areala. *Zaštita prirode*, 1966, vol. 33, pp. 1–167. (In Serb.).
17. Čolić D. Spontana obnova Pančićeve omorike (*Picea omorika* Panč.) posle požara. *Zaštita prirode*, 1987, vol. 40, pp. 37–56. (In Serb.).
18. Dietterich T.G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 1995, vol. 2, pp. 263–286.
<https://doi.org/10.1613/jair.105>
19. Dizdarević M., Lakušić R., Grgić P., Kutleša L., Pavlović B., Jonlija R. Ekološke osnove poimanja reliktnosti vrste *Picea omorica* Pančić. *Bilten Društva ekologa BiH, Serija A*, 1984, vol. 2, pp. 7–56. (In Serb.).
20. Dmitriev E.V. Classification of the Forest Cover of Tver Oblast Using Hyperspectral Airborne Imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50, pp. 929–942. <https://doi.org/10.1134/s0001433814090072>
21. Dmitriev E.V., Kondranin T.V., Zotov S.A. Segmentation of Natural and Anthropogenic Objects by Panchromatic Satellite Images Using Statistical Textural Features. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2022, vol. 58, pp. 167–179.
<https://doi.org/10.3103/s8756699022020029>
22. Fukarek P. Staništa Pančićeve omorike nakon šumskih požara u 1946/47 godini. *Šumarski list*, 1951, vol. 75, pp. 61–75. (In Serb.).
23. Fukarek P., Fukarek Đ. Sukcesivni niz subasocijacija unutar zajednica omorike (*Piceetum omorikae* Tregubov, emend. P. Fukarek) u njenim sastojinama u istočnoj Bosni. *Šumarski list*, 1989, vol. 113, no. 11–12, pp. 567–580. (In Serb.).
24. Gao B.-c. NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, vol. 58, iss. 3, pp. 257–266. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3,1996.A](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3,1996.A)
25. Gitelson A.A., Viña A., Ciganda V., Rundquist D.C., Arkebauer T.J. Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops. *Geophysical Research Letters*, 2005, vol. 32, iss. 8. art. no. L08403. <https://doi.org/10.1029/2005GL022688>
26. Govedar Z., Krstić M., Stanivuković Z. Categorisation of Trees in Serbian Spruce Natural Stands in the Region of Govza in the Republic of Srpska. *50 Godini Lesotehničkei Universitet*. Bulgaria, Sofia, 2003, pp. 96–101.
27. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*: 2nd ed. New York, Springer, 2009. 745 p.
<https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
28. Hou W., Li D., Xu C., Zhang H., Li T. An Advanced k Nearest Neighbor Classification Algorithm Based on KD-tree. *2018 IEEE International Conference of Safety Produce Informatization (IICSPI)*. China, Chongqing, 2018, pp. 902–905.
<https://doi.org/10.1109/IICSPI.2018.8690508>
29. IUCN, 2021. *The IUCN Red List of Threatened Species*. Version 2020-3. Available at: <https://www.iucnredlist.org/> (accessed 15.08.24).
30. Ivetić V., Aleksić J.M. Response of Rare and Endangered Species *Picea omorika* to Climate Change – The Need for Speed. *Reforesta*, 2016, vol. 2, pp. 81–99.
<https://doi.org/10.21750/REFOR.2.09.24>
31. Keeley J.E. Fire Intensity, Fire Severity and Burn Severity: a Brief Review and Suggested Usage. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, vol. 18, iss. 1, pp. 116–126.
<https://doi.org/10.1071/WF07049>

32. Knipling E.B. Physical and Physiological Basis for the Reflectance of Visible and Near-Infrared Radiation from Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1970, vol. 1, iss. 3, pp. 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)

33. Mataruga M., Milanović Đ., Čurić A. *Smjernice za očuvanje Pančičeve omorike – in situ*. Republic Institute for the Protection of Cultural, Historical and Natural Heritage, 2024. 83 p. (In Serb.).

34. Mataruga M., Piotti A., Daničić V., Cvjetković B., Fussi B., Konnerth M., Vendramin G.G., Aleksić J.M. Towards the Dynamic Conservation of Serbian Spruce (*Picea omorika*) Western Populations. *Annals of Forest Science*, 2020, vol. 77, art. no. 1. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0892-1>

35. Maly M. Beiträge zur Kenntnis der *Picea omorika*. *Glasnik Zemaljskoga Muzeja BiH*, 1934, vol. 46, pp. 37–64. (In Germ.).

36. Pančić J. *Omorika nova fela četinaru u Srbiji*. Beograd, Težak, 1887, vol. XVIII, no. 1, pp. 1–8. (In Serb.).

37. Rasmussen C.E., Williams C.K.I. *Gaussian Processes for Machine Learning*. Massachusetts, Cambridge, MIT Press, 2006. 247 p. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3206.001.0001>

38. Rouse J.W.Jr., Haas R.H., Scheel J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings of the 3rd Earth Resource Technology Satellite-1 (ERTS-1) Symposium*, 1974, vol. 1, pp. 48–62.

39. Shaw R.G., Etterson J.R. Rapid Climate Change and the Rate of Adaptation: Insight from Experimental Quantitative Genetics. *New Phytologist*, 2012, vol. 195, iss. 4, pp. 752–765. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2012.04230.x>

40. Scogings P.F. Perspective: Monitoring Global Forests Using Only Structural Metrics – Problems and Solutions from a Savanna Viewpoint. *Forest Ecology and Management*, 2023, vol. 546, art. no. 121381. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121381>

41. Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between Leaf Pigment Content and Spectral Reflectance across a Wide Range of Species, Leaf Structures and Developmental Stages. *Remote Sensing of Environment*, 2002, vol. 81, iss. 2–3, pp. 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)

42. Stojanović O. Prirast i oblik stabla Pančičeve omorike na njenom prirodnom staništu. *Radovi Šumarskog fakulteta i Instituta za šumarstvo i drvnu industriju u Sarajevu*, 1959, vol. 7(4), pp. 163–188. (In Serb.). <https://doi.org/10.54652/rsf.1959.v7.i4.403>

43. Taloor A.K., Manhas D.S., Kothiyari G.C. Retrieval of Land Surface Temperature, Normalized Difference Moisture Index, Normalized Difference Water Index of the Ravi Basin using Landsat Data. *Applied Computing and Geosciences*, 2021, vol. 9, art. no. 100051. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100051>

44. Talukdar N.R., Ahmad F., Goparaju L., Choudhury P., Arya R., Qayum A., Rizvi J. Forest Fire Estimation and Risk Prediction Using Multispectral Satellite Images: Case Study. *Natural Hazards Research*, 2024, vol. 4, iss. 2, pp. 304–319. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.01.007>

45. Tomppo E., Olsson H., Ståhl G., Nilsson M., Hagner O., Katila M. Combining National Forest Inventory Field Plots and Remote Sensing Data for Forest Databases. *Remote Sensing of Environment*, 2008, vol. 112, iss. 5, pp. 1982–1999. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.03.032>

46. Tošić M. O jednom novom nalazištu pančičeve omorike (*Picea omorika* Pančić) u Srbiji. *Radovi ANUBiH. Odjeljenje prirodnih i tehničkih nauka*, 1983, vol. 72(21), pp. 267–274. (In Serb.).

47. Vapnik V.N. *The Nature of Statistical Learning Theory*: 2nd ed. New York, Springer, 1999. 314 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3264-1>

48. Wang S., Li H., Niu S. Empirical Research on Climate Warming Risks for Forest Fires: A Case Study of Grade I Forest Fire Danger Zone, Sichuan Province, China. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 14, art. no. 7773. <https://doi.org/10.3390/su13147773>

49. Wang X.-Q., Ran J.-H. Evolution and Biogeography of Gymnosperms. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2014, vol. 75, pp. 24–40.

<https://doi.org/10.1016/j.ympev.2014.02.005>

50. Wang H., Shao X.-m., Jiang Y., Fang X.-q., Wu S.-h. The Impacts of Climate Change on the Radial Growth of *Pinus koraiensis* along Elevations of Changbai Mountain in Northeastern China. *Forest Ecology and Management*, 2013, vol. 289, pp. 333–340.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.023>

51. Wettstein R. Das Vorkommen der *Picea Omorica* (Panč.) Willk. in Bosnien. *Oesterreichische botanische Zeitschrift*, 1890a, vol. 40, no. 10, pp. 357–361. (In Germ.).

52. Wettstein R. Die Omorika-Fichte, *Picea omorika* (Panč.). Eine monographische Studie. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 1890b, vol. 99, no. 10, pp. 502–565. (In Germ.).

53. Woinarski J.C.Z., Legge S., Lindenmayer D.B., Robinson N.M., Scheele B.C., Southwell D.M., Wintle B.A. A Framework for Evaluating the Adequacy of Monitoring Programs for Threatened Species. *Monitoring Threatened Species and Ecological Communities*. Clayton, CSIRO Publ., 2018, pp. 13–20.

54. Woodmansee R.G., Wallach L.S. Effects of Fire Regimes on Biogeochemical Cycles. *Fire Regimes and Ecosystem Properties: Proceedings of the Conference*. Washington, D.C., USDA Forest Service, General Technical Report WO-GTR-26, 1981, pp. 379–400.

55. Xie D., Du H., Xu W.-H., Ran J.-H., Wang X.-Q. Effects of Climate Change on Richness Distribution Patterns of Threatened Conifers Endemic to China. *Ecological Indicators*, 2022, vol. 136, art. no. 108594. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108594>

56. Xu Y., Zang R. Conservation of Rare and Endangered Plant Species in China. *iScience*, 2023, vol. 26, iss. 2, art. no. 106008. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.106008>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest