

ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

А. И. ВОЛОСЮК¹⁾, А. А. ТОПАЗ²⁾

¹⁾Белгослес, ул. Железнодорожная, 27, корп. 1, 220089, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты исследования особенностей автоматизированного выявления лесопокрытых территорий, пройденных пожарами, по материалам разновременных спутниковых съемок с космических аппаратов Sentinel-2A и Sentinel-2B путем расчета разностного нормализованного индекса сгорания (dNBR) для предпожарного и послепожарного периодов. Изучено современное состояние проблемы и выполнен обзор функционирующих в настоящее время систем наблюдения за лесными пожарами. Обоснована актуальность разработки и апробации автоматизированной системы оценки последствий лесных пожаров с использованием открытого программного обеспечения и данных дистанционного зондирования Земли. Установлено, что разностный индексный показатель dNBR, рассчитанный по материалам разновременных спутниковых съемок с космических аппаратов Sentinel-2A и Sentinel-2B, позволяет эффективно выявлять выгоревшие территории. Показано, что экосистема языка программирования Python дает возможность создавать системы автоматизированной обработки данных дистанционного зондирования Земли. Разработан прототип системы автоматизированного выявления лесопокрытых территорий, пройденных пожарами, по материалам разновременных спутниковых съемок с космических аппаратов Sentinel-2A и Sentinel-2B. Приведена технологическая схема процесса обработки данных дистанционного зондирования Земли с помощью предложенной системы. Для снимков спутников Sentinel-2 на даты до и после пожара выполнен расчет разностного индексного показателя dNBR, анализ результатов которого показал тесную корреляцию индекса dNBR со степенью выгорания территории. Составлена картосхема пройденных пожаром территорий и проведена оценка точности выделения выгоревших участков посредством расчета матрицы ошибок. Определены эффективность работы автоматизированной системы выявления территорий, пройденных лесными пожарами, пути ее модернизации и совершенствования, а также перспективы внедрения в производственную деятельность. Установлено, что результаты работы созданной системы обладают высокой достоверностью. В то же время отмечена необходимость повышения чувствительности системы при выявлении территорий, подвергшихся частичному выгоранию. Предложен вариант усовершенствования применяемых в работе алгоритмов посредством внедрения мультиуровневого метода Оцу, призванного значительно повысить чувствительность системы.

Ключевые слова: лесные пожары; мониторинг; данные дистанционного зондирования Земли; спутник Sentinel-2; Python-библиотека eo-learn.

Благодарность. Авторы выражают благодарность компании *Sinergise Laboratory for Geographical Information Systems* (Словения) за любезно предоставленный доступ к API сервиса Sentinel Hub (<https://www.sentinel-hub.com>) во время проведения исследования.

Образец цитирования:

Волосюк АИ, Топаз АА. Оценка последствий лесных пожаров на основе автоматизированной обработки материалов дистанционного зондирования Земли. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2022;1:57–70.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-1-57-70>

For citation:

Valasiuk AI, Topaz AA. Assessment of forest fire effects based on automated processing of Earth remote sensing imagery. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2022;1:57–70. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2521-6740-2022-1-57-70>

Авторы:

Андрей Иванович Волосюк – инженер отдела дистанционного зондирования и мониторинга лесов.
Антонина Анатольевна Топаз – кандидат географических наук, доцент; доцент кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Andrew I. Valasiuk, engineer at the department of remote sensing and monitoring.
frolui29@gmail.com
Antonina A. Topaz, PhD (geography), docent; associate professor at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.
topaz_antonina@mail.ru

ASSESSMENT OF FOREST FIRE EFFECTS BASED ON AUTOMATED PROCESSING OF EARTH REMOTE SENSING IMAGERY

A. I. VALASIUK^a, A. A. TOPAZ^b

^aBelgosles, 27 Čyhunačnaja Street, 1 building, Minsk 220089, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: A. A. Topaz (topaz_antonina@mail.ru)

The article presents a study of the automated detection specifics within forest-covered areas traversed by fires based on the different time satellite imagery from the Sentinel-2A and Sentinel-2B using the differential normalised burn ratio index (dNBR) for the pre-fire and post-fire periods the calculation. The studies carried out on the research topic are given and a review of the currently functioning forest fire monitoring systems has been implemented. The urgency of the development and testing of an automated system for assessing the forest fire consequences using open source software and Earth remote sensing data has been substantiated. It has been established that the differential index dNBR, calculated from the Sentinel-2A and Sentinel-2B satellite images captured on different dates makes it possible to effectively detect burned-out areas. It is shown that the Python ecosystem makes it possible to successfully create systems for automated processing of Earth remote sensing data. A prototype of a system for the automated detection of forest-covered areas traversed by fires has been developed, based on the materials of different dates satellite imagery from Sentinel-2A and Sentinel-2B spacecraft. The flowchart of the algorithm of processing Earth remote sensing data using the proposed system was presented. For the Sentinel-2 satellite images for the dates before and after the fire, the differential index dNBR was calculated, the analysis of the results of which showed a close correlation of the dNBR index with the degree of burnout of the territory. A schematic map of the areas affected by the fire has been drawn up and the accuracy of identifying burned-out areas has been assessed by calculating the confusion matrix. An assessment of the effectiveness of the automated system for identifying areas affected by forest fires, ways of its modernisation and improvement, as well as the prospects for implementation in production has been carried out. It is noted that the results of the created system have high reliability indicators. At the same time, the need was revealed to increase the sensitivity of the system when identifying areas that have undergone partial burnout. A variant of improving the algorithms used in the work by introducing the multilevel Otsu's method, intended to significantly increase the sensitivity of the system, has been proposed.

Keywords: forest fires; monitoring; Earth remote sensing data; Sentinel-2 satellite; eo-learn Python framework.

Acknowledgements. The authors are grateful to *Sinergise Laboratory for Geographical Information Systems* (Slovenia) for the kindly provided access to the API of Sentinel Hub (<https://www.sentinel-hub.com>) during the research.

Введение

В последнее время климатические изменения, вызванные как глобальным потеплением, так и локальными факторами (хозяйственная деятельность человека, мелиорация), обусловили рост количества лесных пожаров в наиболее пожароопасные весенний и летний периоды. В этих условиях задача оперативной оценки последствий лесных пожаров в целях планирования работ по противодействию пожарам и восстановлению поврежденных лесных территорий приобретает ощутимую значимость.

В Республике Беларусь предприятием «Белгослес» на постоянной основе проводится учет выгоревших лесных территорий. Это необходимо для оценки последствий природных пожаров, обновления информации о лесах, планирования природоохранных и лесовосстановительных мероприятий. Классический подход к решению задачи определения выгоревших площадей и степени выгорания базируется главным образом на анализе материалов полевых обследований, а также экспертной оценке последствий пожаров по разновременным данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1]. Однако выявление и анализ возросшего количества лесных пожаров без использования средств автоматизации – дорогостоящий и затруднительный процесс. По этой причине в настоящее время во всем мире ведутся работы по созданию автоматизированных систем обнаружения и оценки лесных пожаров. При этом основным направлением создания подобных систем является разработка моделей автоматизированной обработки данных ДЗЗ, так как использование последних существенно упрощает процесс оценки гарей и в ряде случаев (болота, заповедные территории) значительно превосходит по точности оценку на местности.

Таким образом, актуальность выполненных авторами исследований обусловлена выявленной в последние годы необходимостью оперативной и экономически целесообразной оценки последствий лесных пожаров, а их главная цель заключалась в разработке и апробации автоматизированной системы оценки последствий лесных пожаров с использованием открытого программного обеспечения и данных ДЗЗ.

Предпосылкой для проведения исследований послужило наличие открытых данных наблюдения Земли (материалов ДЗЗ) в рамках программ *Copernicus* (ESA) и *Landsat* (USGS), представляющих собой беспрецедентный ресурс при решении множества задач, таких как мониторинг океанических и земельных ресурсов, борьба со стихийными бедствиями, работа аварийных служб и т. д.

Реализуемая в рамках настоящего исследования система призвана автоматизировать процесс получения векторных данных, описывающих площади гарей, в целях ускорения анализа последствий лесных пожаров, уменьшения его трудоемкости и повышения экономической эффективности.

В качестве объекта исследования была выбрана территория ГЛХУ «Полесский лесхоз», в качестве исходных данных – материалы съемки со спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B.

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день одним из основных направлений в разработке систем автоматизированной обработки данных ДЗЗ является использование индексных показателей, рассчитанных по материалам ДЗЗ и обладающих повышенной информативностью в отношении объекта исследования по сравнению с исходными данными.

Спектральный индекс – это показатель, вычисляемый в результате операций с разными спектральными диапазонами данных ДЗЗ. Его суть состоит в преобразовании каждого пиксела изображения, при этом новое значение пиксела определяется с помощью математических операций со значениями спектральных яркостей данного пиксела в различных каналах.

В настоящей работе в качестве основного спектрального индексного показателя, используемого проектируемой системой при выделении и анализе выгоревших территорий, выбран разностный нормализованный индекс сгорания (dNBR). Впервые он упомянут в исследовании [2], где была предпринята попытка оценить эффективность двух индексов степени сгорания – нормализованного (dNBR) и составного (СВІ). Первый индекс рассчитан по материалам космического аппарата (КА) Landsat, второй получен на основе данных полевых исследований.

В целом теоретическим обоснованием использования индекса dNBR послужили многочисленные научные работы зарубежных авторов и широкий опыт применения его в сфере оценки последствий лесных пожаров. Так, в исследовании [3] были проанализированы 10 различных спектральных показателей для 13 типов лесов юго-востока Австралии с учетом стратегий возобновления лесной растительности в целях выявления индексов, наиболее подходящих для оценки степени выгорания. Анализ показал низкую чувствительность всех индексов к воздействию пожаров в тропических лесах. Исходя из этого, сделан вывод, что оптимальный спектральный индекс для количественной оценки тяжести пожара зависит от типа леса, но есть возможность группировать леса по структуре и стратегии регенерации огня, чтобы упростить классификацию степени опасности пожара в разнородных лесных ландшафтах.

В статье [4] приведены обобщающие материалы по оценке опыта использования индекса dNBR в бореальном лесном регионе Северной Америки. Исследования показали, что оценка физических и экологических последствий пожара в бореальных лесах имеет далеко идущие последствия для различных экосистемных процессов, таких как преемственность лесов после пожара, а также для принятия решений по управлению земельными ресурсами. Результаты сопоставления и картографирования степени тяжести последствий пожаров в бореальной области были переменными, что, вероятно, частично объясняется широкой изменчивостью условий растительности и рельефа, характерных для этого региона. Отмечается, что в исследованиях следует избегать спутникового дистанционного зондирования только последствий пожара без надлежащей полевой калибровки. Для успешного картографирования степени тяжести пожара необходим выборочный подход, сочетающий полевые данные и данные дистанционного зондирования. Спутниковые оценки тяжести пожара, в частности индекс dNBR и связанные с ним индексы, должны использоваться разумно и оцениваться на предмет соответствия потребностям пользователей. Также при использовании спутниковой информации в бореальном лесном регионе следует учитывать проблемы, характерные только для высоких широт.

Рассмотренные работы исследуют и показывают возможность применения нормализованного индекса сгорания (NBR) в рамках двухвременного (до и после пожара) подхода [3]. Однако данные исследования [5] позволяют говорить об эффективности этого показателя и в рамках одновременного (после пожара) подхода. Согласно результатам указанной работы индекс NBR, полученный по данным КА Landsat, используется в США в качестве инструмента оперативного управления и создания карт тяжести пожара в рамках проекта по восстановлению сгоревших территорий (BAER). При этом точные оценки тяжести пожара имеют первостепенное значение для моделирования выбросов следовых газов, вызванных пожаром, и реабилитации ландшафтов после пожара. Результаты работы подтверждают целесообразность оперативного использования индекса NBR в чапаральных экосистемах в рамках проекта BAER и демонстрируют потенциал объединения оптических и тепловых данных для оценки степени опасности пожара.

Таким образом, на сегодняшний момент разностный нормализованный индекс сгорания dNBR является одним из наиболее оптимальных инструментов для анализа выгоревших территорий и поэтому находит широкое применение в существующих системах наблюдения за лесными пожарами.

Попытки создания систем автоматизированного обнаружения, выделения и анализа лесных пожаров являются рациональным продолжением исследований по изучению спектральных характеристик лесных территорий, подвергнувшихся выгоранию. Среди функционирующих в настоящее время систем автоматизированного обнаружения, выделения и анализа лесных пожаров основными считаются:

- SERVIR's Forest Fire Detection and Monitoring System [6];
- ИСМД-Послесхоз [7; 8];
- Fire Information for Resource Management System (Global Fire Information Monitoring System) [9];
- Global Wildfire Information System [10];
- European Forest Fire Information System (EFFIS) [11];
- ScanEx Fire Monitoring Service [12].

Стоит отметить, что указанные системы обладают различным пространственным охватом. Так, система SERVIR's Forest Fire Detection and Monitoring System является локальной. Она разработана для борьбы с лесными пожарами в районе Гиндукуш – Гималаи. Системы ИСМД-Послесхоз и EFFIS представляют собой региональные системы. Они предназначены для работы с территорией Российской Федерации и Европейского союза соответственно. Остальные системы являются глобальными.

Изучение этих шести систем показало, что основными данными ДЗЗ, используемыми для оперативного выявления пожаров, выступают материалы съемки с КА Terra и КА Aqua, оснащенных датчиком MODIS. Несомненным преимуществом такого подхода является оперативность, так как данные могут обновляться с частотой около трех раз в сутки. Однако при этом материалы обладают недостаточным пространственным разрешением (от 250 м до 1 км) для получения детальных векторных изображений выгоревших территорий [13].

В свете вышеизложенной информации выявляется потенциал разрабатываемой системы при детальном выделении выгоревших территорий. Представляется возможным создание комплексной системы, в которой фиксация пожара и предварительное геопозиционирование осуществляются с помощью одного из рассмотренных выше сервисов, после чего данные о пожаре и ограничивающий его векторный файл передаются в разрабатываемую систему для получения детального векторного представления выгоревшей территории.

Материалы и методы исследования

В качестве объекта исследования был выбран участок территории Республики Беларусь и смежной территории Украины, ограниченный прямоугольником (51,7415 с. ш., 27,2391 в. д.; 51,6032 с. ш., 27,4465 в. д.) и входящий в состав ГЛХУ «Полесский лесхоз» (рис. 1).

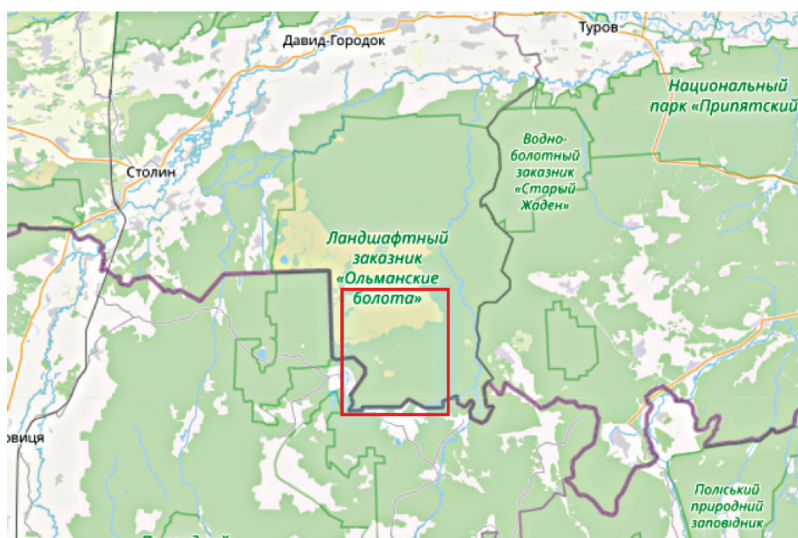


Рис. 1. Фрагмент карты OpenStreetMap с указанием территории исследования.
Источник: [14]

Fig. 1. Fragment of the OpenStreetMap map showing the study area.
Source: [14]

Основную часть исследуемого участка занимает республиканский ландшафтный заказник «Ольманские болота» площадью 94 219 га¹. Он является одной из самых больших особо охраняемых природных территорий не только в Беларуси, но и в Европе и имеет статус территории международного значения, важной для птиц, и статус Рамсарского угодья [15].

Особый охранный режим, отсутствие населенных пунктов и развитой дорожной сети, залесенность, слабый и неустойчивый снеговой покров, а также значительные запасы биомассы являются ключевыми факторами, обусловившими высокую подверженность данной территории лесным пожарам, особенно в весенний период. Указанное обстоятельство послужило основой для выбора этой площадки в качестве объекта исследования.

Исходными данными ДЗЗ выступили материалы съемки со спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B (уровень преобработки L1C) (рис. 2).

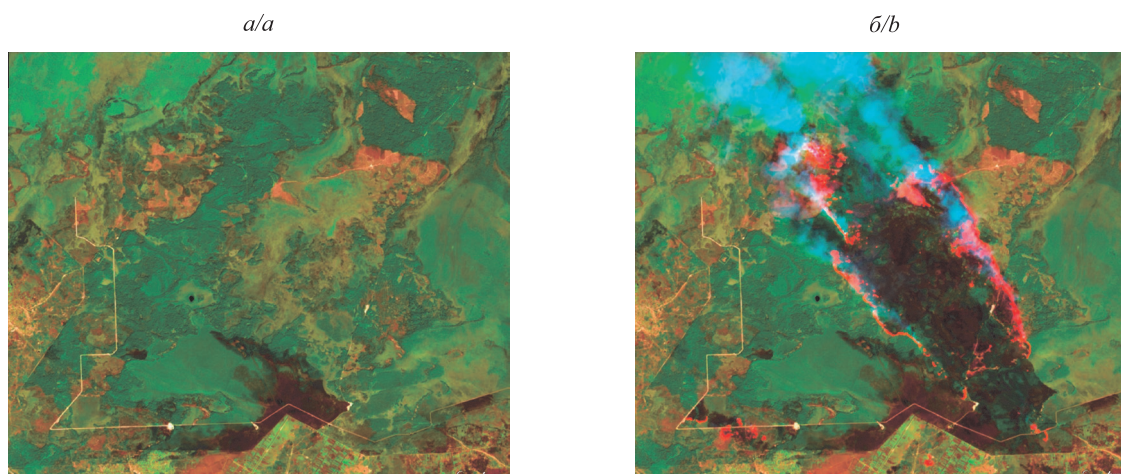


Рис. 2. Фрагменты снимков на даты до и после выгорания, синтезированные по схеме 12 – 8А – 4 (RGB):
а – 19.04.2019; б – 24.04.2019

Fig. 2. Fragments of images for the dates before and after burnout, synthesised according to scheme 12 – 8A – 4 (RGB):
a – 19.04.2019; b – 24.04.2019

Sentinel-2 – семейство спутников ДЗЗ Европейского космического агентства, созданное в рамках проекта глобального мониторинга окружающей среды и безопасности *Copernicus* [16]. В табл. 1 приведены исходные спутниковые данные.

Таблица 1

База данных исходной информации

Table 1

Database of initial information

Снимок	Спутник	Дата съемки	Количество каналов	Ширина полосы охвата, км	Пространственное разрешение, м (номера каналов)
S2A_MSIL1C_20190419T092031_N0207_R093_T35UMT_20190419T104513	Sentinel-2A	19.04.2019	13	290	10 (2, 3, 4, 8)
S2B_MSIL1C_20190424T092039_N0207_R093_T35UNT_20190424T130102	Sentinel-2B	24.04.2019			20 (5, 6, 7, 8A, 11, 12) 60 (1, 9, 10)

Спутники Sentinel-2 предназначены для мониторинга использования земель, растительности, лесных и водных ресурсов, также они могут применяться при ликвидации последствий стихийных бедствий [17]. Спектральные и пространственные характеристики спутниковых данных приведены в табл. 2.

¹Обоснование биологического заказника «Бродница»: отчет о НИС / Брест. гос. ун-т; рук. темы В. Т. Демяничик. Брест, 1996. 38 с.

Спектральное и пространственное разрешение спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B

Table 2

Spectral and spatial resolution of Sentinel-2A and Sentinel-2B satellites

Канал	Центральная длина волны, нм		Ширина полосы, нм		Пространственное разрешение, м
	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Sentinel-2A	Sentinel-2B	
Band 1. Coastal aerosol	442,7	442,2	21	21	60
Band 2. Blue	492,4	492,1	66	66	10
Band 3. Green	559,8	559,0	36	36	10
Band 4. Red	664,6	664,9	31	31	10
Band 5. Vegetation red edge	704,1	703,8	15	16	20
Band 6. Vegetation red edge	740,5	739,1	15	15	20
Band 7. Vegetation red edge	782,8	779,7	20	20	20
Band 8. NIR	832,8	832,9	106	106	10
Band 8A. Narrow NIR	864,7	864,0	21	22	20
Band 9. Water vapour	945,1	943,2	20	21	60
Band 10. SWIR – Cirrus	1373,5	1376,9	31	30	60
Band 11. SWIR	1613,7	1610,4	91	94	20
Band 12. SWIR	2202,4	2185,7	175	185	20

Источник: [18].

Несмотря на отсутствие панхроматического канала, данные спутников Sentinel-2A and Sentinel-2B обладают наилучшим соотношением пространственных, спектральных и временных показателей среди спутниковых данных ДЗЗ, находящихся в открытом доступе, что особенно важно с учетом значительного количества облачных дней, характерных для территории Беларуси, а также динамичности природных процессов. Во временном отношении спутники Sentinel-2A и Sentinel-2B более чем в 3 раза превосходят спутники Landsat 7, Landsat 8 и Белорусский космический аппарат, делая повторную съемку одного и того же участка земной поверхности через 5 дней вместо 16 и 18 дней соответственно [18–20].

При разработке автоматизированной системы оценки последствий лесных пожаров использовалось открытое программное обеспечение – Python-библиотеки Scikit-learn, GeoPandas, NumPy, Matplotlib, Shapely, Mahotas, sentinelhub, eo-learn.

При тестировании системы применялись исходные данные спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B, распространяемые под открытой лицензией Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 IGO (CC BY-SA 3.0 IGO) и размещенные на сайте сервиса Sentinel Hub.

Открытое программное обеспечение (англ. *open-source software*) – программное обеспечение с открытым исходным кодом. Исходный код таких программ доступен для просмотра, изучения и изменения, что позволяет убедиться в отсутствии уязвимостей и неприемлемого для пользователя функционала (к примеру, скрытого слежения за пользователем программы), принимать участие в доработке самой открытой программы, использовать код для создания новых программ и исправления в них ошибок через заимствование исходного кода, если это позволяет совместимость лицензий, или через изучение использованных алгоритмов, структур данных, технологий, методик и интерфейсов [21].

В качестве среды разработки применялся пакет *Jupyter Notebook*, обеспечивающий построчное выполнение кода на языке программирования Python с возможностью генерации отчетов в графической и текстовой формах.

Основным рабочим инструментом являлась библиотека eo-learn (версия 0.7.2), которая служит связующим звеном между ДЗЗ и экосистемой Python.

Eo-learn – это набор пакетов Python с открытым исходным кодом, разработанных для беспрепятственного доступа и своевременной автоматизированной обработки пространственно-временных рядов

изображений, полученных любым спутниковым парком. Eo-learn написана на языке программирования Python и использует структуры данных EOpatch (далее – патчи) на основе массивов NumPy для хранения и обработки данных дистанционного зондирования. Библиотека eo-learn разрабатывается и распространяется под лицензией MIT. Это разрешительная лицензия открытого программного обеспечения, разработанная Массачусетским технологическим институтом [22].

В общем виде система автоматизированной обработки материалов ДЗЗ содержит три подсистемы, которые включают в себя задачи на обработку данных ДЗЗ, реализуемые как объекты базового класса EOTask.

Первая подсистема – загрузка и предобработка материалов ДЗЗ:

- добавление в патчи мультиспектральных данных;
- расчет облачных масок;
- расчет разностного индексного показателя dNBR;
- сохранение данных патчей во внутреннем формате.

Вторая подсистема – автоматизированная обработка материалов ДЗЗ:

- фильтрация растровых данных;
- пороговая бинаризация индексного изображения.

Третья подсистема – постобработка и экспорт результатов обработки:

- экспорт сегментированного изображения в формат GeoTIFF;
- векторизация сегментированного изображения;
- экспорт векторного файла.

Алгоритм автоматизированной обработки материалов ДЗЗ можно представить блок-схемой в виде набора процессов с указанием промежуточных этапов (рис. 3).

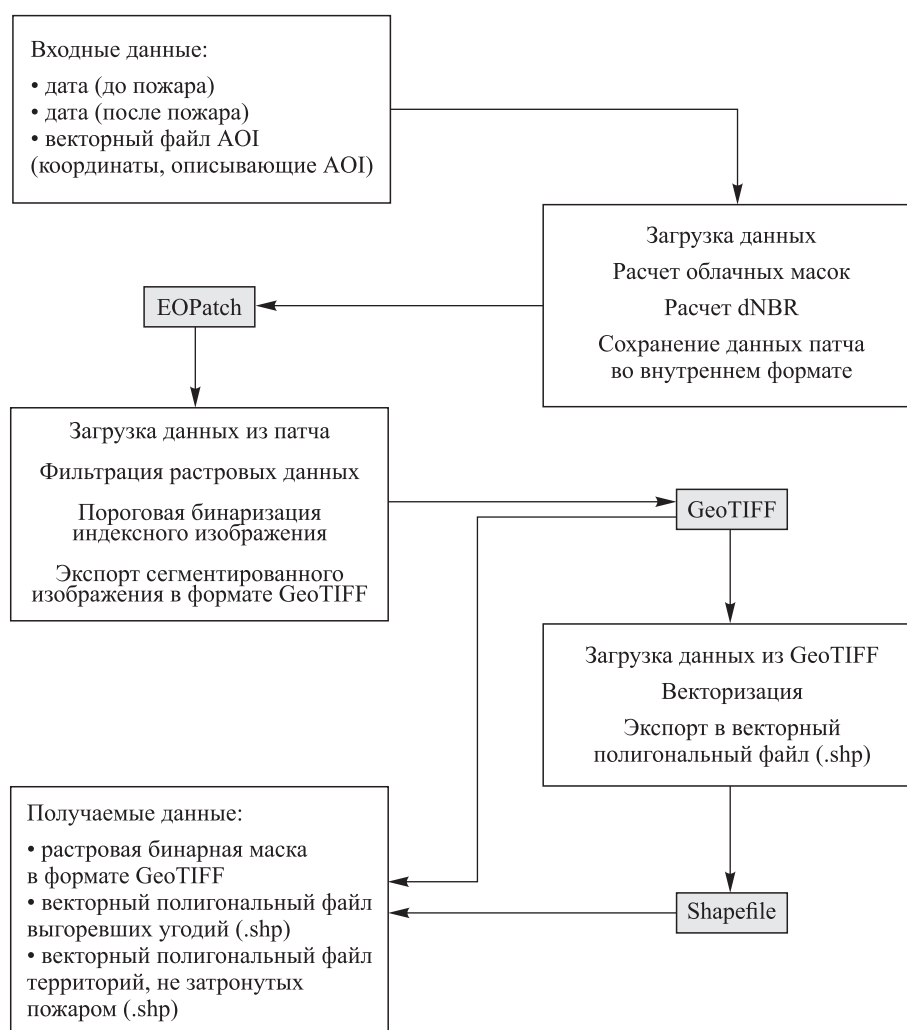


Рис. 3. Технологическая схема процесса обработки материалов ДЗЗ

Fig. 3. Technological scheme of the processing Earth remote sensing materials

После определения все задачи, реализуемые как объекты базового класса EOTask, формируются в рабочий процесс («конвейер») – EOWorkflow [23]. Подобный подход позволяет осуществлять контроль за соблюдением правильного порядка выполнения операций.

Расчет индекса NBR производился согласно формуле, полученной из электронной базы данных спектральных индексов [2; 23]. В соответствии с ней показатель NBR для данных спутников Sentinel-2 равен отношению разности значений 9-го и 12-го каналов к сумме значений 9-го и 12-го каналов (в нашем случае – каналов 8А и 12). Канал 8А соответствует ближнему ИК-излучению, канал 12 – коротковолновому ИК-излучению.

Лесная растительность, как и прочий растительный покров, характеризуется высокой отражательной способностью в зеленой зоне, минимумом отражения в синей и красной зонах и резким увеличением отражения в ближней ИК-зоне электромагнитного спектра. Это вызвано отражением зеленых лучей и поглощением синих и красных лучей хлорофиллом, содержащимся в растительности, тогда как большое отражательное значение в ИК-зоне объясняется пропусканием ИК-лучей хлорофиллом и отражением их внутренними тканями листьев.

Отражение в ИК-зоне подвержено резкому изменению вследствие пожара. В связи с этим принцип действия алгоритма обнаружения основан на фиксации данных изменений через соотношения между ближним ИК-излучением (NIR) и коротковолновым ИК-излучением (SWIR) на дату, предшествовавшую пожару, и дату после него, максимально близкую к дате пожара [2]. В общем виде формула расчета может быть представлена как

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}.$$

После расчета указанного спектрального индексного показателя на даты до и после пожара производилось вычисление разностного показателя dNBR с помощью канальной математики:

$$dNBR = NBR \text{ (до пожара)} - NBR \text{ (после пожара)}.$$

Результат выполнения задачи по расчету разностного индексного показателя dNBR в условных единицах представлен на рис. 4.

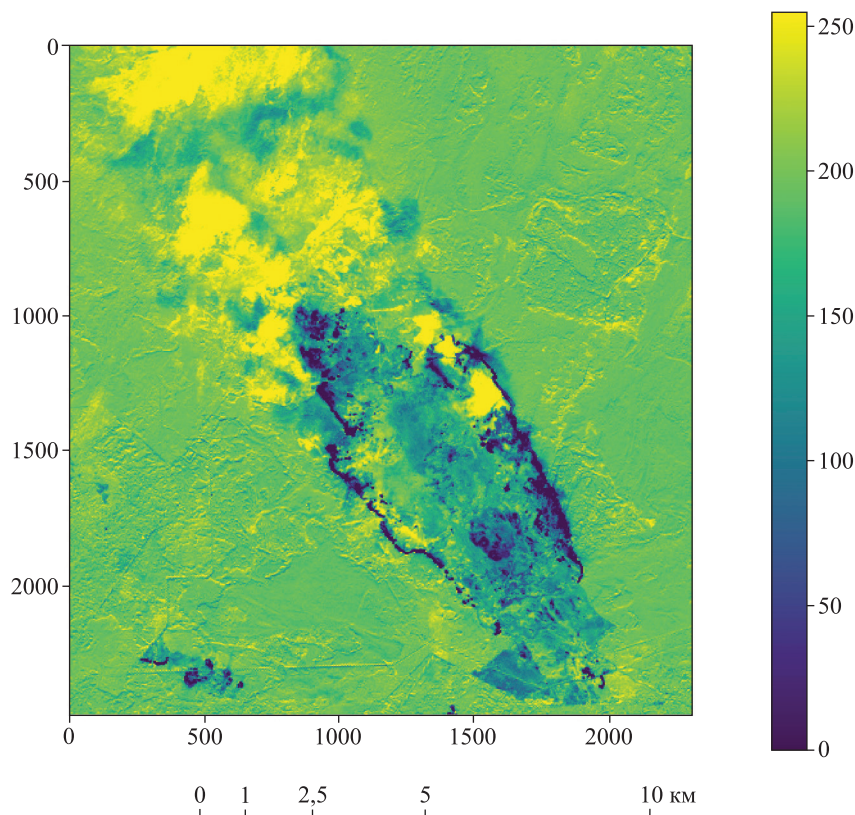


Рис. 4. Результат расчета индексного показателя dNBR

Fig. 4. Result of computation index indicator dNBR

Как видно из рис. 4, наименьшее значение dNBR в диапазоне 0–50 характерно для областей, подвергшихся наиболее сильному выгоранию, либо областей с открытым огнем. Для области с дымом от пожара характерны значения, близкие к максимуму (около 250). Территория, не подвергшаяся выгоранию, отличается однородностью значений и их консолидацией вблизи отметки 200.

Площадь выгоревшей территории, выявленной при работе алгоритма, составила 2093 га.

Промежуточными этапами в работе системы являются растровое индексное изображение во внутреннем формате библиотеки eo-learn и растровое сегментированное изображение в формате GeoTIFF.

На заключительном этапе работы алгоритм формирует векторный файл в формате Shapefile (.shp), содержащий полигоны участков, подвергшихся выгоранию (рис. 5).

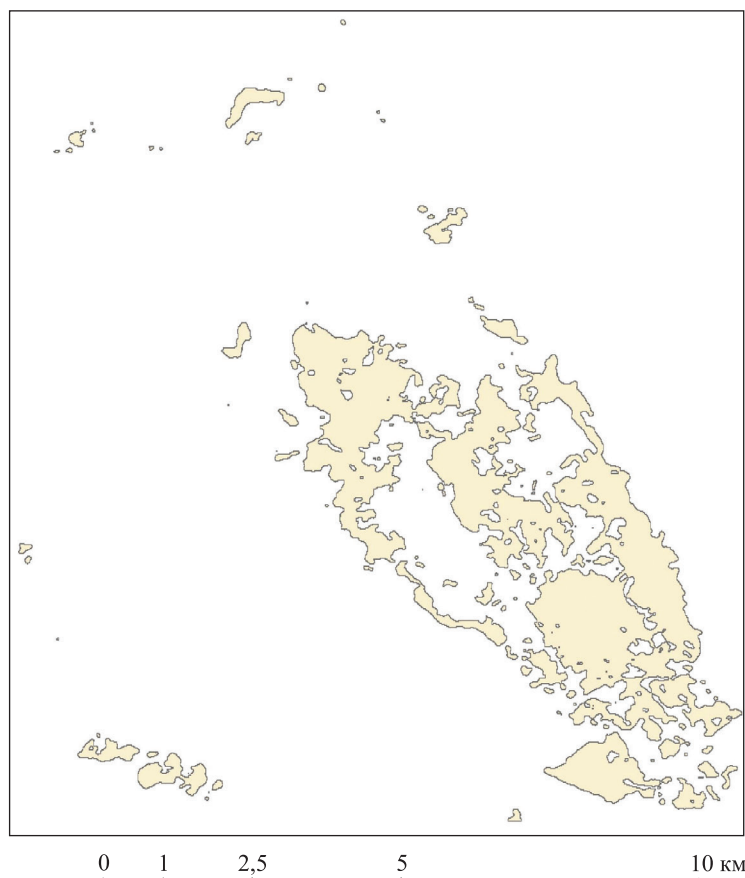


Рис. 5. Графическое представление векторного файла выгоревшей территории в программном комплексе ArcGIS 10.3

Fig. 5. Graphical representation of the vector file of the burned-out area in the ArcGIS 10.3 software package

Результаты и их обсуждение

Результаты работы алгоритма наглядно представлены на картосхеме пройденных пожаром территорий, составленной с использованием материалов спутниковой съемки, синтезированных в искусственных цветах по схеме комбинации каналов 12 – 8А – 4 (SWIR – Narrow NIR – Red) (рис. 6).

Картосхема позволяет выполнить оценку полученных результатов и их сравнение с данными экспертной оценки.

Оценка точности выделения выгоревших участков производилась путем расчета матрицы ошибок на основании данных экспертной оценки.

Матрица ошибок (англ. *confusion matrix*) – один из наиболее широко применимых методов оценки качества классификации, используемый в области машинного обучения и анализа изображений, также известный как матрица соответствия. Данный метод позволяет легко оценить, насколько эффективно система разделяет два класса [24].

Расчет матрицы ошибок был выполнен с помощью программного пакета *ENVI Exelis 5.3* – профессионального программного пакета, ориентированного на обработку и анализ материалов ДЗЗ и интеграцию полученной информации с ГИС [25].

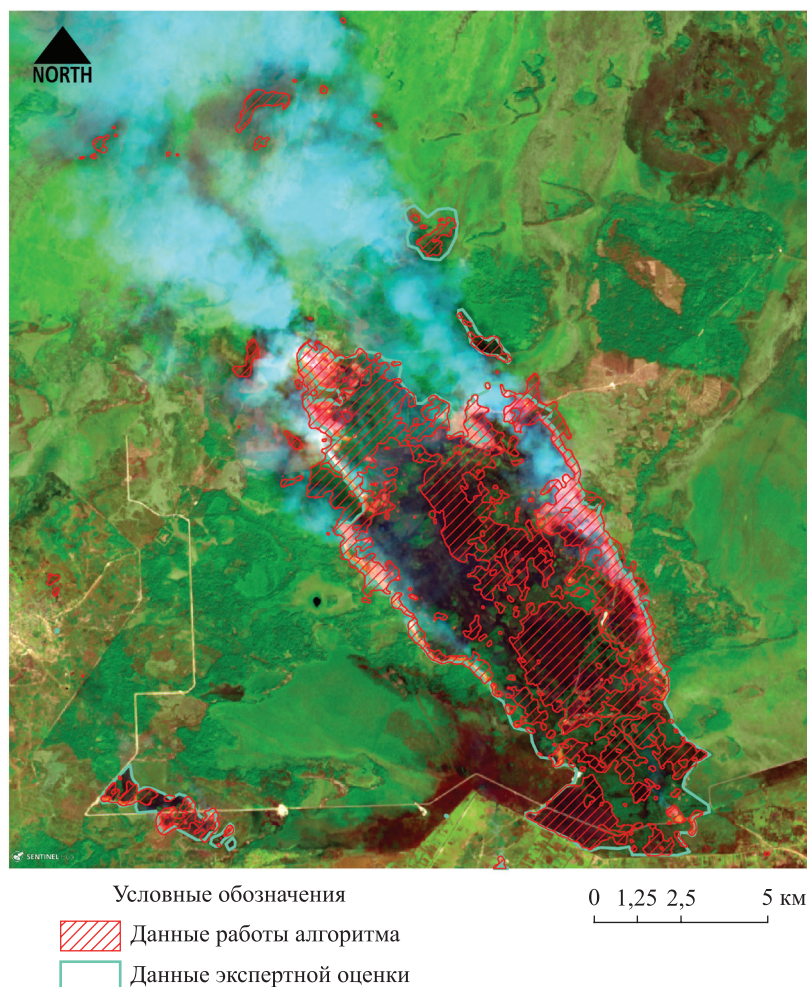


Рис. 6. Картограмма пройденных пожаром территорий

Fig. 6. Schematic map of burned lands

Для соблюдения чистоты эксперимента в качестве данных ДЗЗ при экспертной оценке использовался тот же снимок заданной области на дату после пожара, который обрабатывался автоматизированной системой. Также было исключено влияние корректирующих алгоритмов, так как использованные материалы ДЗЗ имеют уровень предобработки, аналогичный данным, загружаемым автоматизированной системой (см. табл. 1).

Векторные материалы экспертной оценки были преобразованы в ROI (*region of interest*). Расчет матрицы ошибок производился с помощью функции *classification – post classification – confusion matrix using ground truth ROIs*.

В ходе построения матрицы ошибок вычисляются такие показатели оценки точности, как *overall accuracy* (общая точность) и *kappa coefficient* (коэффициент каппа).

Значения данных показателей составили:

- *overall accuracy* (общая точность) – 92,26 % (т. е. 92,26 % пикселей были классифицированы правильно);
- *kappa coefficient* (коэффициент каппа) – 0,64 (согласно интерпретации [26] это соответствует наличию существенного согласия между данными экспертной оценки и данными, полученными в результате работы автоматизированной системы).

Из табл. 3 следует, что 98,69 % пикселей, соответствующих территории, не подверженной выгоранию, и 55,89 % пикселей, относящихся к выгоревшей территории, были классифицированы верно.

Это свидетельствует о том, что результаты, получаемые при работе автоматизированной системы, обладают очень высокой достоверностью (98,69 % территорий, идентифицированных как невыгоревшие, были классифицированы правильно). Однако следует отметить, что порог чувствительности алгоритма пороговой бинаризации не является оптимальным. Об этом свидетельствует тот факт, что лишь 55,89 % выгоревших территорий были выявлены алгоритмом.

Таблица 3

Матрица ошибок (фрагмент)

Table 3

Confusion matrix (fragment)

Территория	Экспертная оценка, %		Общий процент
	ROI #1 (пожар был)	ROI #2 (пожара не было)	
Выгоревшая	55,89	1,31	9,51
Невыгоревшая	44,11	98,69	90,49
<i>Итого</i>	100	100	100

Среди причин, обусловивших столь низкий порог чувствительности алгоритма автоматизированного выделения выгоревших территорий, можно отметить:

- частичную задымленность территории на дату после пожара;
- значительные тоновые контрасты между территориями, затронутыми верховыми и низовыми пожарами.

Исходя из приведенной информации, можно заключить, что представленная система достаточно эффективно справляется с поставленными перед ней задачами.

Оценивая потенциал внедрения разработанной системы в производственную деятельность, стоит отметить, что система имеет существенные достоинства, однако нуждается в доработке механизма сегментации индексного изображения.

Как сказано выше, данные, получаемые в ходе работы системы, обладают достаточно высокой достоверностью, но порог чувствительности алгоритма, установленный автоматически, не является оптимальным. Возможным решением этой проблемы может стать применение мультиуровневого метода Оцу [27], суть которого состоит в задании нескольких порогов разбиения, характеризующихся различным уровнем достоверности выделения [28]. Потенциально данное решение пригодно также для качественной оценки степени повреждения насаждений огнем.

Заключение

На сегодняшний момент разностный нормализованный индекс сгорания является одним из наиболее оптимальных инструментов для анализа выгоревших территорий и находит широкое применение в существующих системах обнаружения и оценки возгораний.

Изучение функционирующих в настоящее время систем автоматизированного обнаружения, выделения и анализа лесных пожаров показало, что основными источниками спутниковой информации, используемыми для оперативного выявления пожаров, выступают данные КА Terra и КА Aqua, оснащенных датчиком MODIS. Несомненным преимуществом подобного подхода является оперативность, так как данные могут обновляться с частотой около трех раз в сутки. Однако упомянутые системы обладают недостаточным пространственным разрешением для получения детальных векторных изображений выгоревших территорий.

В связи с этим, несмотря на отсутствие панхроматического канала, данные спутников Sentinel-2A и Sentinel-2B характеризуются наилучшим соотношением пространственных, спектральных и временных показателей среди спутниковых данных ДЗЗ, находящихся в открытом доступе.

При разработке автоматизированной системы оценки последствий лесных пожаров основным рабочим инструментом являлась библиотека eo-learn, которая служит связующим звеном между ДЗЗ и экосистемой Python. Eo-learn – это набор пакетов Python с открытым исходным кодом.

В общем виде система автоматизированной обработки материалов ДЗЗ включает три подсистемы: подсистему загрузки и предобработки материалов ДЗЗ, подсистему автоматизированной обработки материалов ДЗЗ, подсистему постобработки и экспорта результатов обработки.

Решение, предоставляемое системой, обладает общей точностью 92,26 %. Это говорит о том, что 92,26 % пикселей были классифицированы правильно. Коэффициент каппа при этом составляет 0,64, что согласно интерпретации [26] соответствует наличию существенного согласия между данными экспертной оценки и данными, полученными в результате работы автоматизированной системы.

Функционал созданной системы позволяет в полном объеме решать поставленные задачи, начиная с момента получения входных данных и заканчивая экспортом векторного полигонального файла, описывающего территорию, подвергшуюся выгоранию.

Оценивая потенциал внедрения разработанной системы в производственную деятельность, стоит отметить, что система нуждается в доработке механизма сегментации индексного изображения. Потенциальным решением данной проблемы является использование мультиуровневого метода Оцу [27].

Основное перспективное направление развития темы, рассмотренной в настоящей статье, – применение методов классификации с обучением для непосредственной качественной оценки степени воздействия пожара (выделение степени повреждения лесных насаждений), что потребует полевой калибровки эталонов, так как согласно обобщающим исследованиям, использованным в ходе работы, следует избегать спутникового дистанционного зондирования только последствий пожара без надлежащей полевой калибровки. Выборочный подход, сочетающий значения поля и изображения состояния ожога, необходим для успешного картографирования степени пожара (ожога).

Также следует отметить значительный потенциал разработки, связанный с применением иных спектральных показателей, методов фильтрации и детекции. Подобные изменения не требуют глобальной перестройки созданных процессов, что обуславливает высокий потенциал адаптации созданной системы.

Библиографические ссылки

1. Бариев ЭР, Золотой СА, Котов СГ, Кудряшов АН, Семенов ОА. *Совершенствование технических средств повышения оперативности обнаружения природных пожаров*. Минск: Республиканский центр сертификации и экспертизы лицензируемых видов деятельности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь; 2009. 174 с.
2. Key CH, Benson N, Ohlen D, Howard S, McKinley R, Zhu Z. The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation. In: Greer JD, editor. *Rapid delivery of remote sensing products. Proceedings of the Ninth Forest Service remote sensing applications conference; 2002 April 8–12; San Diego, USA* [CD-ROM]. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 2002. 1 CD-ROM: 4 3/4 in.
3. Tran BN, Tanase MA, Bennett LT, Aponte C. Evaluation of spectral indices for assessing fire severity in Australian temperate forests. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1680. DOI: 10.3390/rs10111680.
4. French NHF, Kasischke ES, Hall RJ, Murphy KA, Verbyla DL, Hoyet EE, et al. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results. *International Journal of Wildland Fire*. 2008;17(4):443–462. DOI: 10.1071/WF08007.
5. Harris S, Veraverbeke S, Hook S. Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (southern California) using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. *Remote Sensing*. 2011;3(11):2403–2419. DOI: 10.3390/rs3112403.
6. SERVIR's Forest Fire Detection and Monitoring System in Nepal [Internet]. SERVIR, 2012 May 10 [cited 2020 February 27]. Available from: <https://servirglobal.net/Global/Articles/Article/1143/servirs-forest-fire-detection-and-monitoring-system-in-nepal>.
7. Беляев АИ, Ершов ДВ, Лупян ЕА, Романюк БВ, Сухинин АИ, Ташилин СА. Национальная система сбора, обработки и анализа информации о природных пожарах и ее сопряжение с международными и региональными информационными сетями. В: *Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне. Материалы Международного научно-практического семинара; 9–12 сентября 2003 г.; Хабаровск, Россия*. Москва: Алек; 2004. с. 156–166.
8. Лупян ЕА, Баргалева СА, Ершов ДВ, Котельников РВ, Балашов ИВ, Бурцев МА и др. Организация работы со спутниковыми данными в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015;12(5):222–250.
9. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) [Internet]. 2020 [cited 2020 February 29]. Available from: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>.
10. Global Wildfire Information System (GWIS) [Internet]. 2020 [cited 2020 February 29]. Available from: <https://gwis.jrc.ec.europa.eu/>.
11. European Forest Fire Information System (EFFIS) [Internet]. 2020 [cited 2020 February 29]. Available from: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>.
12. ScanEx Fire Monitoring Service in Russia [Internet]. 2010 July 6 [cited 2021 June 13]. Available from: <https://www.scanex.ru/company/smi/scanex-fire-monitoring-service-in-russia1903/>.
13. MODIS components [Internet]. 2020 [cited 2021 September 18]. Available from: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>.
14. OpenStreetMap [Internet]. 2020 [cited 2020 February 28]. Available from: <https://www.openstreetmap.org/>.
15. Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэспублікі Беларусь. *Нацыянальны атлас Беларусі*. Мясніковіч МУ, Казулін АУ, Шымаў УМ, Пірожнік ІІ, Цэйрэфман КА, Пашкевіч МФ і інш., рэдактары. Мінск: Белкартаграфія; 2002. 292 с.
16. Regulation (EU) No. 377/2014 of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 establishing the Copernicus Programme and repealing Regulation (EU) No. 911/2010 (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*. 2014;L122:44–66.
17. Sentinel-2 – the operational Copernicus optical high resolution land mission [Internet]. European Space Agency, 2013 [cited 2021 April 16]. Available from: https://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf.
18. Sentinel-2 [Internet]. 2021 [cited 2021 February 28]. Available from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
19. U. S. Geological Survey. Landsat – Earth observation satellites (version 1.2, April 2020): USGS Fact Sheet 2015-3081 [Internet]. 2020 [cited 2021 June 15]. Available from: <https://doi.org/10.3133/fs20153081>.

20. Белорусский космический аппарат (БКА) [Интернет]. Геоинформационные системы, 2021 [процитировано 28 февраля 2021 г.]. Доступно по: <https://gis.by/ru/tech/bka>.
21. St. Laurent AM. *Understanding open source and free software licensing*. Sebastopol: O'Reilly Media; 2008. 231 p.
22. Eo-learn [Internet]. 2020 [cited 2020 February 28]. Available from: <https://eo-learn.readthedocs.io/en/latest/>.
23. Index DataBase: a database for remote sensing indices [Internet]. The IDB Project, 2011– [cited 2020 March 21]. Available from: <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=53>.
24. Stehman SV. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 1997; 62(1):77–89. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
25. ENVI [Internet]. L3Harris Geospatial Solutions, 2020 [cited 2020 March 22]. Available from: <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>.
26. Henry F, Herwindiati DE, Mulyono S, Hendryli J. Sugarcane land classification with satellite imagery using logistic regression model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;185:012024. DOI: 10.1088/1757-899X/185/1/012024.
27. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979; 9(1):62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
28. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A fast algorithm for multilevel thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*. 2001;17(5):713–727.

References

1. Bariev ER, Zolotoy SA, Kotov SG, Kudryashov AN, Semenov OA. *Sovershenstvovanie tekhnicheskikh sredstv povysheniya operativnosti obnaruzheniya prirodnykh pozharov* [Improvement of technical means for increasing the efficiency of detecting natural fires]. Minsk: Belarusian State Centre for Accreditation, Ministry of Emergencies of the Republic of Belarus; 2009. 174 p. Russian.
2. Key CH, Benson N, Ohlen D, Howard S, McKinley R, Zhu Z. The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation. In: Greer JD, editor. *Rapid delivery of remote sensing products. Proceedings of the Ninth Forest Service remote sensing applications conference; 2002 April 8–12; San Diego, USA* [CD-ROM]. Bethesda: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing; 2002. 1 CD-ROM: 4 3/4 in.
3. Tran BN, Tanase MA, Bennett LT, Aponte C. Evaluation of spectral indices for assessing fire severity in Australian temperate forests. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1680. DOI: 10.3390/rs10111680.
4. French NHF, Kasischke ES, Hall RJ, Murphy KA, Verbyla DL, Hoyet EE, et al. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results. *International Journal of Wildland Fire*. 2008;17(4):443–462. DOI: 10.1071/WF08007.
5. Harris S, Veraverbeke S, Hook S. Evaluating spectral indices for assessing fire severity in chaparral ecosystems (southern California) using MODIS/ASTER (MASTER) airborne simulator data. *Remote Sensing*. 2011;3(11):2403–2419. DOI: 10.3390/rs3112403.
6. SERVIR's Forest Fire Detection and Monitoring System in Nepal [Internet]. SERVIR, 2012 May 10 [cited 2020 February 27]. Available from: <https://servirglobal.net/Global/Articles/Article/1143/servirs-forest-fire-detection-and-monitoring-system-in-nepal>.
7. Belyaev AI, Ershov DV, Lupyan EA, Romanyuk BV, Sukhinin AI, Tashchilin SA. [National system for collecting, processing and analysing information on wildfires and its interface with international and regional information networks level]. In: *Upravlenie lesnymi pozharami na ekoregional'nom urovne. Materialy Mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar; 9–12 sentyabrya 2003 g.; Khabarovsk, Rossiya* [Materials of the International scientific and practical seminar; 2003 September 9–12; Khabarovsk, Russia]. Moscow: Aleks; 2004. p. 156–166. Russian.
8. Loupian EA, Bartalev SA, Ershov DV, Kotel'nikov RV, Balashov IV, Burtsev MA, et al. Satellite data processing management in Forest Fires Remote Monitoring Information System (ISDM-Rosleskhoz) of the Federal Agency for Forestry. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space*. 2015;12(5):222–250. Russian.
9. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) [Internet]. 2020 [cited 2020 February 29]. Available from: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>.
10. Global Wildfire Information System (GWIS) [Internet]. 2020 [cited 2020 February 29]. Available from: <https://gwis.jrc.ec.europa.eu/>.
11. European Forest Fire Information System (EFFIS) [Internet]. 2020 [cited 2020 February 29]. Available from: <https://effis.jrc.ec.europa.eu/>.
12. ScanEx Fire Monitoring Service in Russia [Internet]. 2010 July 6 [cited 2021 June 13]. Available from: <https://www.scanex.ru/company/smi/scanex-fire-monitoring-service-in-russia1903/>.
13. MODIS components [Internet]. 2020 [cited 2021 September 18]. Available from: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/components.php>.
14. OpenStreetMap [Internet]. 2020 [cited 2020 February 28]. Available from: <https://www.openstreetmap.org/>.
15. Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus. *Natsyjanal'ny atlas Belarusi* [National atlas of Belarus]. Mjasnikovich MU, Kazulin AU, Shymaw UM, Pirozhnik II, Cjejrjefman KA, Pashkevich ME, et al., editors. Minsk: Belkartagrafija; 2002. 292 p. Belarusian.
16. Regulation (EU) No. 377/2014 of the European Parliament and of the Council of 3 April 2014 establishing the Copernicus Programme and repealing Regulation (EU) No. 911/2010 (Text with EEA relevance). *Official Journal of the European Union*. 2014;L122:44–66.
17. Sentinel-2 – the operational Copernicus optical high resolution land mission [Internet]. European Space Agency, 2013 [cited 2021 April 16]. Available from: https://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf.
18. Sentinel-2 [Internet]. 2021 [cited 2021 February 28]. Available from: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
19. U. S. Geological Survey. Landsat – Earth observation satellites (version 1.2, April 2020): USGS Fact Sheet 2015-3081 [Internet]. 2020 [cited 2021 June 15]. Available from: <https://doi.org/10.3133/fs20153081>.
20. Belarusian Spacecraft (BS) [Internet]. Geoinformation systems, 2021 [cited 2021 February 28]. Available from: <https://gis.by/en/tech/bka>.
21. St. Laurent AM. *Understanding open source and free software licensing*. Sebastopol: O'Reilly Media; 2008. 231 p.

22. Eo-learn [Internet]. 2020 [cited 2020 February 28]. Available from: <https://eo-learn.readthedocs.io/en/latest/>.
23. Index DataBase: a database for remote sensing indices [Internet]. The IDB Project, 2011– [cited 2020 March 21]. Available from: <https://www.indexdatabase.de/db/i-single.php?id=53>.
24. Stehman SV. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sensing of Environment*. 1997; 62(1):77–89. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
25. ENVI [Internet]. L3Harris Geospatial Solutions, 2020 [cited 2020 March 22]. Available from: <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>.
26. Henry F, Herwindiati DE, Mulyono S, Hendryli J. Sugarcane land classification with satellite imagery using logistic regression model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;185:012024. DOI: 10.1088/1757-899X/185/1/012024.
27. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979; 9(1):62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
28. Ping-Sung Liao, Tse-Sheng Chen, Pau-Choo Chung. A fast algorithm for multilevel thresholding. *Journal of Information Science and Engineering*. 2001;17(5):713–727.

Получена 05.01.2022 / исправлена 18.03.2022 / принята 24.03.2022.
Received 05.01.2022 / revised 18.03.2022 / accepted 24.03.2022.