

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ «SENTINEL-2» И «LANDSAT-8»

К. Я. ЛИС¹⁾, Д. А. КИСЛИЦЫН¹⁾, А. А. ТОПАЗ¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Аннотация. Представлен методический подход к идентификации лесного пожара в юго-восточной части Лельчицкого района Гомельской области по данным разновременных космических снимков «Sentinel-2» и «Landsat-8». Рассмотрена возможность использования информации о спектральных индексах для оценки уровня вегетации различных экосистем. Для идентификации выгоревшей территории в программном комплексе ArcGIS (версия 10.7) выполнен геоинформационный анализ разницы индексов NBR, NDVI, BAI за период с 5 по 10 апреля 2020 г. по космическим снимкам «Sentinel-2» и за период с 25 марта по 10 апреля 2020 г. по космическим снимкам «Landsat-8». В созданных в среде ModelBuilder двух моделях геообработки использованы 29 и 15 инструментов соответственно, что позволяет в значительной степени автоматизировать процесс выявления территории, пострадавшей от лесного пожара. Предварительная идентификация выгоревшей территории проведена на основе участков, соответствующих двум или трем индексным критериям, которые были определены по результатам выполнения первой модели геообработки. Применение сочетаний как минимум двух индексных критериев дает возможность учесть особенности каждого из индексов и уменьшает вероятные погрешности при идентификации территории, пострадавшей от лесного пожара. Дальнейшее уточнение основано на использовании пространственной информации о сельскохозяйственных землях, которые были выделены в результате автоматизированного дешифрирования космического снимка «Sentinel-2» методом максимального правдоподобия, а также генерализации и векторизации классифицированного раstra. Степень достоверности заметно увеличилась после удаления участков, выбранных на основе индексных критериев, но приуроченных к пахотным и луговым землям. Для количественной оценки точности выполнено пространственное пересечение между векторными слоями, полученными с использованием представленной методики, и результатом визуального дешифрирования. Эффективность применения геоинформационных систем для идентификации и картографирования последствий лесных пожаров по данным дистанционного зондирования Земли подтверждена высоким уровнем достоверности полученных результатов (около 96 и 89 % по снимкам «Sentinel-2» и «Landsat-8» соответственно).

Ключевые слова: лесные пожары; спектральные индексы; «Sentinel-2»; «Landsat-8»; автоматизированное дешифрирование; геоинформационные технологии; ModelBuilder.

Образец цитирования:

Лис КЯ, Кислицын ДА, Топаз АА. Геоинформационное картографирование последствий лесных пожаров по данным спутников «Sentinel-2» и «Landsat-8». *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология.* 2024; 2:24–38.
EDN: HCXYLG

For citation:

Lis KY, Kislitsyn DA, Topaz AA. Geoinformation mapping of the consequences of forest fires according to «Sentinel-2» and «Landsat-8» satellite data. *Journal of the Belarusian State University. Geography and Geology.* 2024;2:24–38. Russian.
EDN: HCXYLG

Авторы:

Карина Ярославовна Лис – преподаватель кафедры геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Дмитрий Андреевич Кислицын – преподаватель кафедры почвоведения и геоинформационных систем факультета географии и геоинформатики.

Антонина Анатольевна Топаз – кандидат географических наук, доцент; заведующий кафедрой геодезии и космоаэрокартографии факультета географии и геоинформатики.

Authors:

Karina Y. Lis, lecturer at the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.
lis.lis-karina@yandex.ru

Dmitry A. Kislitsyn, lecturer at the department of soil science and geographic information systems, faculty of geography and geoinformatics.
dimas_13082000@mail.ru

Antonina A. Topaz, PhD (geography), docent; head of the department of geodesy and aerospace cartography, faculty of geography and geoinformatics.
topaz_antonina@mail.ru

GEOINFORMATION MAPPING OF THE CONSEQUENCES OF FOREST FIRES ACCORDING TO «SENTINEL-2» AND «LANDSAT-8» SATELLITE DATA

K. Y. LIS^a, D. A. KISLITSYN^a, A. A. TOPAZ^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: K. Y. Lis (lis.lis-karina@yandex.ru)

Abstract. This article presents methodological approach for identifying a forest fire in the southeastern part of the Lelchitsy District of the Gomel Region based on data from multi-temporal «Sentinel-2» and «Landsat-8» satellite images. The possibility of using information on spectral indices to assess the level of vegetation of various ecosystems is considered. To identify the burned area in *ArcGIS* software (version 10.7), a geoinformation analysis of the difference in the NBR, NDVI, BAI indices for the period from 5 to 10 April 2020 according to «Sentinel-2» satellite images and from 25 March to 10 April 2020 according to «Landsat-8» satellite images was carried out. The two geoprocessing models created in ModelBuilder environment use 29 and 15 tools, respectively, which allows us to largely automate the process of identifying areas affected by forest fire. The preliminary identification of the burned area was based on areas that met two or three index criteria, which were determined based on the results of the first geoprocessing model. The use of combinations of at least two index criteria makes it possible to take into account the characteristics of each of the indices and reduces possible errors in identifying the territory affected by a forest fire. Further refinement is based on the use of spatial information about agricultural lands, which were identified as a result of automated interpretation of the «Sentinel-2» satellite image using the maximum likelihood method, as well as generalisation and vectorisation of the classified raster. The degree of confidence increased markedly after removing areas selected on the basis of index criteria, but confined to arable lands and grasslands. To quantify the accuracy, a spatial intersection was performed between the vector layers obtained based on the presented technique and the result of visual interpretation. The effectiveness of using geographic information systems for identifying and mapping the consequences of forest fires based on Earth remote sensing data has been confirmed by a high level of reliability of the results obtained (about 96 and 89 % according to «Sentinel-2» and «Landsat-8» satellite data, respectively).

Keywords: forest fires; spectral indices; «Sentinel-2»; «Landsat-8»; automated interpretation; geographic information technologies; ModelBuilder.

Введение

В настоящее время в лесном хозяйстве Беларуси наблюдается устойчивая тенденция к повышению пожарной опасности в лесах. Выявление последствий лесных пожаров с помощью данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяет оперативно получать сведения, необходимые для эффективного и рационального управления природными ресурсами. Этот подход имеет ряд преимуществ перед полевыми методами получения данных. Среди них можно отметить минимальные затраты времени, отсутствие необходимости непосредственного взаимодействия с изучаемым объектом, независимость от погодных условий, низкие трудозатраты. В связи с этим обозначенная тема работы является достаточно актуальной.

Научные исследования в области использования данных ДЗЗ и геоинформационных технологий (ГИС-технологий) для мониторинга лесной растительности, а также выявления последствий лесных пожаров проводятся в широком диапазоне масштабов и охватывают различные территории. Анализ изменений растительного покрова, в том числе лесной растительности, представлен в публикациях, которые затрагивают основные аспекты выбора источников информации [1] и алгоритмов количественной оценки при проведении мониторинга различных экосистем [2]. Среди трудов, посвященных вопросам мониторинга лесных экосистем, актуальными являются работы, связанные с изучением использования спектральных индексов и комплексного картографирования особенностей лесных экосистем, а также земельного покрова с учетом отличий в методике мелкомасштабных [2; 3] и крупномасштабных [4; 5] исследований. Сравнение различных методов автоматизированного дешифрирования (*random forest*, *k-nearest neighbor*, *support vector machine*) при картографировании земельного покрова и лесных экосистем представлено в публикации [4], а анализ динамики разных классов земель, включая леса, на основе совместного использования данных ДЗЗ, ГИС-технологий и статистического анализа с прогнозом на следующие 20 лет отражен в статье [5]. Теоретические аспекты применения данных ДЗЗ для разработки проектов по проведению мониторинга различных ландшафтов подробно рассмотрены в исследованиях [6; 7, p. 27].

Картографирование лесных экосистем с использованием данных ДЗЗ основано на разнообразных методах обработки информации: многовременных преобразованиях Каута – Томаса [8]; применении

классификатора дерева решений, который позволяет учесть различные данные в качестве обучающей выборки для дешифрирования снимков; обнаружении изменений на основе разновременных результатов контролируемой классификации [8; 9]; расчете вегетационных индексов, сегментации многозональных изображений и неконтролируемой классификации методом ISODATA [10].

Ряд современных зарубежных публикаций [11; 12] посвящены подробному анализу использования различных спектральных индексов для идентификации выгоревших территорий, а также оценке уровня точности при сопоставлении результатов, полученных на основе каждого из индексов в отдельности. В работе [13] классификация спутниковых изображений, анализ изменений и эконометрическое моделирование применяются для определения темпов и движущих сил вырубки лесов при исследовании южного региона полуострова Юкатан (Мексика). Оценка состояния лесных экосистем, пострадавших от пожаров, на основе разницы индекса NBR и расчета показателя CBI (композитный индекс гарей) по данным космических снимков «Landsat» для территории Республики Марий Эл и Чувашии (Россия) представлена в статье [14]. Анализу динамики площади лесов, пострадавших от пожаров, по космическим снимкам «MODIS» для территории России за 2006–2013 гг. посвящена статья [15], в которой также оценена степень достоверности результатов на основе космических снимков «Landsat-8».

В статье [16] проанализировано использование данных спутников «Terra» и «Aqua» (продукт MCD64A1) для расчета суммарной площади территорий, пострадавших от природных пожаров, в рамках районов Беларуси с 2001 по 2020 г., и выполнена оценка точности результатов путем сопоставления с космическими снимками «Landsat». В работе [17] изучена динамика индекса NDVI на основе спутниковых данных «MODIS» за два пятилетних периода (с 2000 по 2004 г. и с 2015 по 2019 г.) для лесных, луговых и болотных экосистем, а также антропогенных ландшафтов тестовых участков территории Белорусского Полесья. В статье [18] представлен анализ разницы индекса NBR по космическим снимкам «Sentinel-2» за период до и после пожара для разработки алгоритма автоматизированного выявления выгоревшей территории в ландшафтном заказнике «Ольманские болота». Комплексное применение методов ДЗЗ и ГИС-технологий для мониторинга природных пожаров на основе материалов съемки со спутников «Terra» и «Aqua» (продукт MCD64A1) и спутника «Landsat» в рамках федеральных округов России представлено в публикации [19].

Таким образом, аналитический обзор литературы показал, что данные ДЗЗ и ГИС-технологии активно используются для распознавания и картографирования лесной растительности. В меньшей мере комплексный подход применяется при картографировании последствий лесных пожаров. В работах ученых как ближнего, так и дальнего зарубежья при идентификации выгоревших территорий в основном приводятся сравнение и анализ результатов расчета индексных изображений, полученных на основе лишь отдельных спектральных индексов.

Цель настоящего исследования – разработка методического подхода для автоматизации основных этапов геоинформационного картографирования последствий лесных пожаров по данным спутников «Sentinel-2» и «Landsat-8». Поставленная цель решалась путем создания моделей геообработки в среде ModelBuilder программного комплекса ArcGIS (версия 10.7). Научная новизна исследования заключается в автоматизированном анализе выгоревшей территории на основе комплексного применения данных ДЗЗ и ГИС-технологий при совместном использовании нескольких спектральных индексов, что позволит учесть особенности различных индексов в их совокупности для уменьшения погрешностей, а также повысить общий уровень точности при использовании информации о земельном покрове.

Материалы и методы исследования

Исследуемая территория, общая площадь которой составляет 33 931 га, расположена в окрестностях аг. Стодоличи в Лельчицком и Ельском районах Гомельской области (рис. 1).

Местоположение лесного пожара, который произошел 8 апреля 2020 г. к югу от д. Запесочное Лельчицкого района, определено по данным сервиса «Система информации о пожарах для управления ресурсами» (*Fire Information for Resource Management System, FIRMS*). Выбор территории исследования обусловлен достаточно большой площадью лесного пожара (более 600 га), наличием космических снимков «Sentinel-2» и «Landsat-8» с близкими датами съемок, а также труднодоступностью местности для проведения наземной валидации из-за высокого уровня заболоченности.

В качестве исходных данных ДЗЗ были выбраны мультиспектральные космические снимки «Sentinel-2» (уровень обработки L2A) и «Landsat-8» (уровень обработки collection 2, level 2), которые находятся в открытом доступе в интернет-каталогах сервиса *Sentinel Hub*¹ и Геологической службы США² соответственно. Для изучения динамики спектральных индексов за период до и после пожара применялись

¹EO Browser // Sentinel Hub : website. 2024. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> (date of access: 02.04.2024).

²EarthExplorer // United States Geological Survey : website. 2024. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (date of access: 03.04.2024).

разновременные изображения «Landsat-8» (даты съемки – 25 марта и 10 апреля 2020 г.) с пространственным разрешением 30 м и разновременные изображения «Sentinel-2» (даты съемки – 5 и 10 апреля 2020 г.) с пространственным разрешением 10 м для синего, зеленого, красного и ближнего инфракрасного каналов. Автоматизированное дешифрирование методом максимального правдоподобия проводилось в программном комплексе *ArcGIS* (версия 10.7) для определения контуров сельскохозяйственных земель на основе космического снимка «Sentinel-2» за 5 апреля 2020 г.

При выполнении исследования применялись картографический, геоинформационный и статистический методы, а также технологии обработки данных ДЗЗ. Для выявления последствий лесного пожара использовались индексы NDVI и BAI (рассчитываются на основе спектральных каналов «NIR» и «Red»), а также индекс NBR (рассчитывается на основе спектральных каналов «NIR» и «SWIR2») согласно формулам [20], представленным в табл. 1.

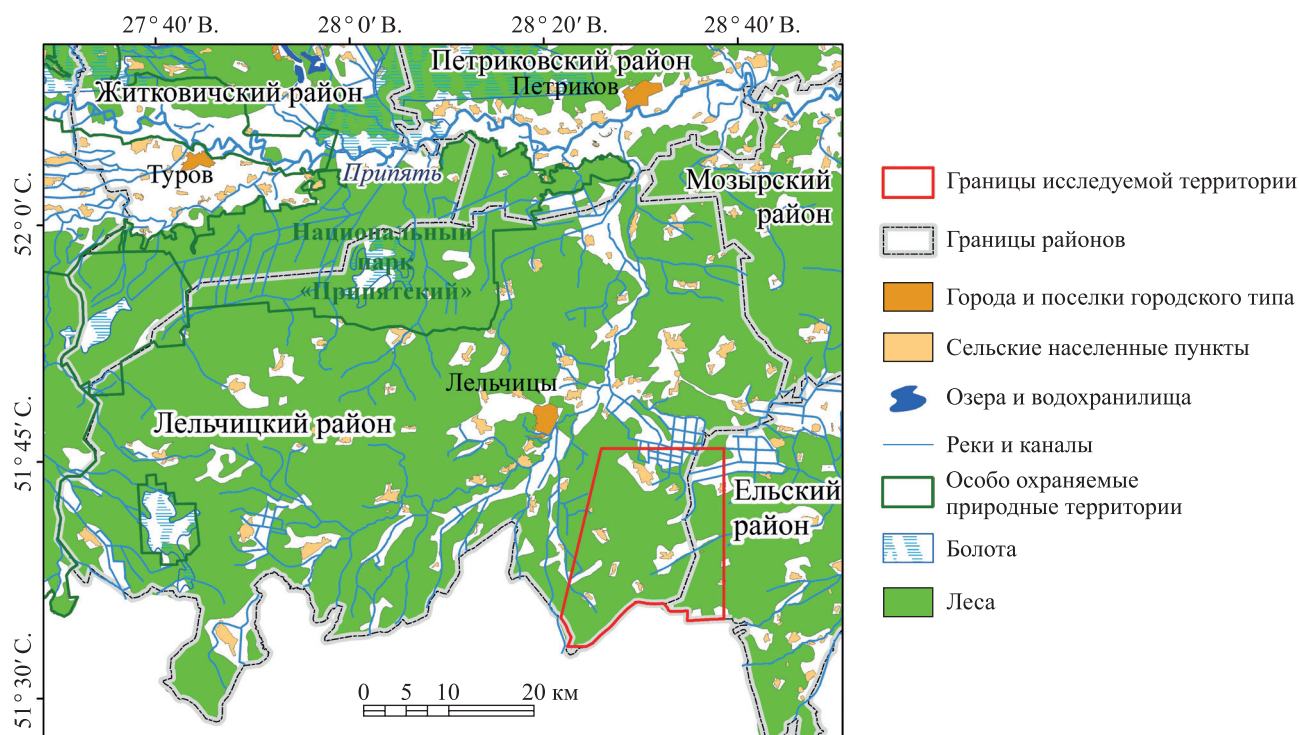


Рис. 1. Расположение территории исследования

Fig. 1. Location of the study area

Таблица 1

Характеристика основных спектральных индексов выгоревших территорий

Table 1

Characteristics of the main spectral indices of burnt areas

Индекс	Полное название	Диапазон значений	Формула расчета
BAI	Индекс выгоревших областей (burn area index)	От 0 и выше	$BAI = \frac{1}{(0,1 - Red)^2 + (0,06 - NIR)^2}$
NBR (NBRI)	Стандартизированный индекс коэффициента выжигания (normalised burn ratio index)	От -1 до 1	$NBRI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$
NDVI	Нормализованный разностный вегетационный индекс (normalised difference vegetation index)	От -1 до 1	$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$

Источник: [20].

Вегетационный индекс NDVI дает возможность определить наличие растительности и ее относительную биомассу, что широко используется в различных научных исследованиях [21]. Индекс NBR позволяет идентифицировать территории, пострадавшие от лесных пожаров, при усилении «углеродного» сигнала на интервале NIR – SWIR (NIR – ближний инфракрасный диапазон, SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон) [22, с. 143]. При этом индекс NBR основывается на том, что в диапазоне NIR здоровая растительность имеет высокую отражательную способность, а в диапазоне SWIR – низкую отражательную способность. Для выгоревших территорий наблюдается противоположная закономерность. Некоторые затруднения при использовании индекса BAI могут быть связаны с тем, что выгоревшие территории и объекты с низкой отражательной способностью (водоемы, тени облаков) имеют близкие значения данного индекса [23]. Следует отметить, что при визуальном дешифрировании космических снимков выгоревшие территории в основном распознаются по темному тону изображения, своеобразной форме участков гарей, а также изрезанным границам территорий, пострадавших от лесных пожаров, что позволяет отделить их от вырубок [22, с. 138].

Для автоматизации процесса определения территории, пострадавшей от лесного пожара, в среде ModelBuilder программного комплекса *ArcGIS* (версия 10.7) были созданы две авторские модели геообработки, которые включают в себя исходные данные, основные параметры и различные инструменты из коллекции ArcToolbox.

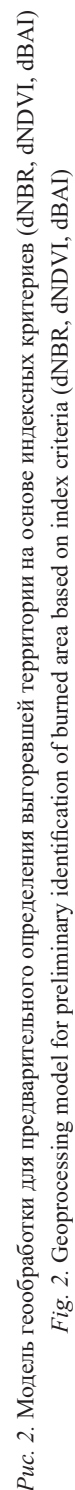
Первая модель геообработки используется для предварительного определения участков выгоревшей территории по индексным критериям на основе разницы индексов NBR, NDVI, BAI за период с 25 марта по 10 апреля и с 5 по 10 апреля 2020 г. по данным космических снимков «Landsat-8» и «Sentinel-2» соответственно. Учитывая, что временной интервал охватывает период незначительного увеличения уровня вегетации, статистически значимые различия для индекса NDVI составили 0,07 и 0,09 при расчете на основе снимков «Landsat-8» и «Sentinel-2» соответственно, а для индекса NBR – 0,065 и 0,13 при расчете на основе снимков «Landsat-8» и «Sentinel-2» соответственно. При вычислении индекса BAI по космическим снимкам «Landsat-8» дополнительно было проведено умножение индексных изображений на 10 000, чтобы улучшить возможность интерпретации полученных результатов в программном комплексе *ArcGIS* (версия 10.7) при классификации значений индекса BAI по интервалам. Таким образом, статистически значимая разница индекса BAI за исследуемый период составила 0,000 6 при расчете на основе снимков «Sentinel-2» и –0,000 01 при расчете на основе снимков «Landsat-8».

В представленной модели геообработки в качестве исходных данных использованы изображения, полученные на основе разницы спектральных индексов (dNDVI, dNBR, dBAI), а также граница исследуемой территории.

Выделение участков с использованием индексных критериев выполняется с помощью инструментов извлечь по атрибутам и калькулятор раstra. Применение таких инструментов, как группировка и извлечь по атрибутам, позволяет удалить контуры, площадь которых составляет менее 9 пк для изображений «Landsat-8» и менее 80 пк для изображений «Sentinel-2». Фильтр индексных критериев используется для выбора минимальной площади контуров (в пк), так как значения данного параметра зависят от пространственного разрешения космических снимков. Затем выполняются автоматическая векторизация с применением инструмента растр в полигоны и геометрическая генерализация с помощью инструментов сгладить полигоны и удалить часть полигона, что позволяет сгладить форму контуров, заполнить пробелы и выбрать участки, площадь которых превышает 0,8 га.

Далее осуществляется пересечение индексных критериев dNDVI и dNBR, dNDVI и dBAI, dNBR и dBAI по отдельности, так как пересечение всех трех индексов заметно уменьшит общую площадь территории с учетом незначительных различий индексов по краям участков. Объединение векторных слоев, полученных на основе каждой из пар индексных критериев, дает возможность выделить участки, которые соответствуют как минимум двум из трех индексных критериев. Последовательное использование инструментов слияние по атрибуту и составной в простые позволяет объединить небольшие контуры, расположенные внутри более крупных участков, и разделить составные объекты на простые объекты, которые геометрически не являются смежными (рис. 2).

В итоге происходит выборка контуров, выделенных на основе индексных критериев и имеющих площадь более 0,8 га. Следует отметить, что для повышения степени достоверности при выявлении лесных пожаров следует применять не только индексные критерии, но и дополнительную информацию, так как погрешность результатов в основном обусловлена схожим уменьшением уровня вегетации на выгоревшей территории и на некоторых участках сельскохозяйственных земель.



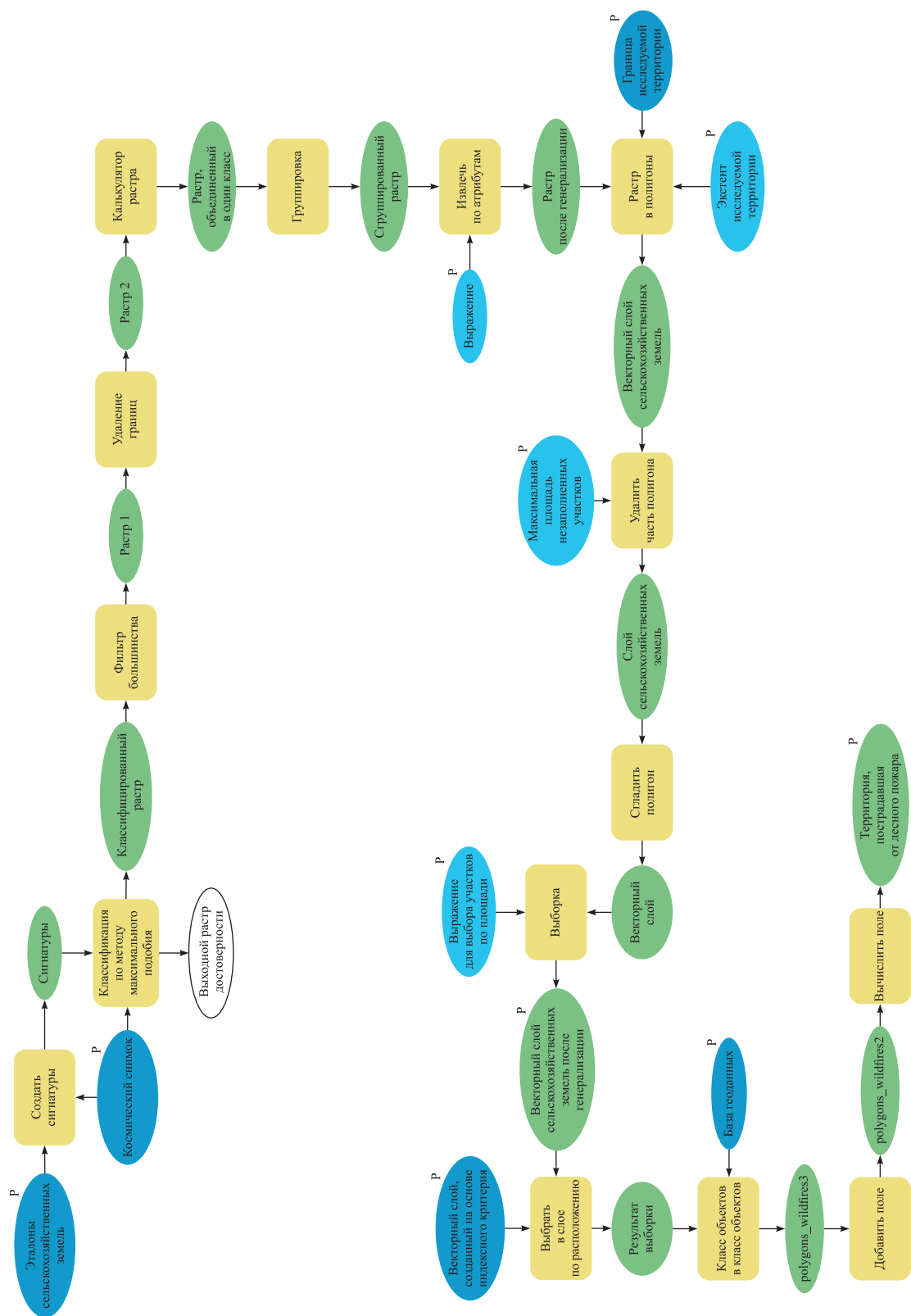


Рис. 3. Модель геообработки для уточнения идентификации лесного пожара
(по данным индексных критериев) на основе дешифрирования сельскохозяйственных земель
Fig. 3. Geoprocessing model for clarify the identification of forest fire
(according to index criteria) based on interpretation of agricultural lands

Вторая модель геообработки выполняет автоматизированное дешифрирование методом максимального правдоподобия для выделения контуров сельскохозяйственных земель, что необходимо для уточнения результатов, полученных на основе индексных критериев. В качестве исходных данных используются эталоны сельскохозяйственных земель, синтезированный космический снимок (в рассматриваемом случае применяется изображение «Sentinel-2»), границы исследуемой территории, а также векторный слой, созданный на основе индексного критерия. Первоначальная генерализация классифицированного раstra выполняется с помощью инструментов фильтр большинства и удаление границ. Внутри класса объектов «сельскохозяйственные земли» наблюдаются заметные спектральные различия, а использование инструмента калькулятор раstra позволяет автоматически объединить различные подклассы объектов, выделенные в составе сельскохозяйственных земель, в один класс.

Далее происходит удаление контуров, площадь которых составляет менее 150 пк (1,5 га), и автоматическая векторизация результата контролируемой классификации. Геометрическая генерализация осуществляется с помощью инструментов удалить часть полигона, сгладить полигоны и выборка, что позволяет заполнить пробелы площадью до 2 га внутри более крупных участков сельскохозяйственных земель, а также сгладить форму и выбрать контуры, площадь которых превышает 2 га (см. рис. 3).

Пространственная информация о сельскохозяйственных землях позволит удалить контуры, которые определены на основе индексного критерия, но приурочены к пахотным и луговым землям. Для решения этой задачи применяется инструмент выбрать в слое по расположению со следующими параметрами: в качестве входного векторного слоя выбраны участки, выделенные по индексному критерию (отношения *have their center in*), контуры сельскохозяйственных земель являются вспомогательными объектами выборки, также выбран пункт инвертировать пространственные отношения. Для сохранения выделенных объектов в отдельный векторный слой использован инструмент класс объектов в класс объектов, а для расчета площади участков выгоревшей территории (в га) использованы инструменты добавить поле и вычислить поле.

Разделение представленной методики на две модели геообработки позволяет вначале визуально оценить достоверность идентификации территории лесного пожара на основе индексных критериев (dNBR, dNDVI, dBAI), а затем повысить общий уровень точности путем использования информации о сельскохозяйственных землях.

Результаты и их обсуждение

При расчете индексных критериев выделены участки на основе разницы индексов NBR, NDVI, BAI за период с 25 марта по 10 апреля 2020 г. по данным космических снимков «Landsat-8». Площадь участков, соответствующих статистически значимой разнице индекса NDVI (dNDVI), составляет 992,7 га, площадь участков, соответствующих индексному критерию dNBR, – 1434,8 га, а площадь участков, соответствующих индексному критерию dBAI, – 891,0 га. Использование только одного из представленных индексных критериев может увеличить погрешность при определении выгоревшей территории, которая характеризуется неравномерным снижением уровня вегетации в зависимости от типа природных экосистем (лесные, болотные, кустарниковые). Так, по индексному критерию dNBR не выделен фрагмент участка болотной экосистемы в пределах выгоревшей территории. Для индексных критериев dNBR и dNDVI заметно выделение не только участков лесного пожара, но и некоторых контуров пахотных земель, на которых произошло снижение уровня вегетации за исследуемый период. После выполнения пересечения индексных критериев dNDVI и dNBR, dNDVI и dBAI, dNBR и dBAI по отдельности и объединения векторных слоев, полученных на основе каждой из пар индексных критериев, общая площадь контуров составила 1049,5 га. Она включает в себя не только выгоревшую территорию (к югу от д. Запесочное), но и участки сельскохозяйственных земель (в основном в окрестностях аг. Стодоличи и д. Усов) (рис. 4).

Также были выделены участки на основе индексных критериев dNBR, dNDVI, dBAI за период с 5 по 10 апреля 2020 г. по данным космических снимков «Sentinel-2». Площадь участков, соответствующих статистически значимым показателям dNBR, составляет 735,4 га, площадь участков, соответствующих статистически значимым показателям dNDVI, – 787,9 га, а площадь участков, соответствующих статистически значимым показателям dBAI, – 665,1 га. Использование методики, позволяющей выделить участки, которые соответствуют двум или трем индексным критериям, необходимо для снижения количества погрешностей (по критерию dNDVI не выделен фрагмент участка болотной экосистемы в северной части выгоревшей территории, а по критерию dNBR не выделен небольшой участок болота в южной части территории, пострадавшей от лесного пожара). Для индексных критериев dNBR, dNDVI, dBAI, вычисленных на основе изображений «Sentinel-2», замечен аналогичный характер проявления неточностей, как и в случае их расчета на основе изображений «Landsat-8», но в меньшей степени, так как период между космическими снимками, сделанными до и после пожара, для изображений «Sentinel-2»

короче, чем для изображений «Landsat-8» (5 и 17 дней соответственно). Общая площадь контуров, соответствующих двум или трем индексным критериям (на основе снимков «Sentinel-2»), составила 751,4 га. Она включает в себя не только территорию, пострадавшую от лесного пожара, но и небольшие участки сельскохозяйственных земель (рис. 5).

Статистический анализ значений индексных критериев dNBR, dNDVI, dBAI свидетельствует о том, что лесные земли имеют средние значения данных показателей, заметно меньшие, чем выгоревшая территория (при использовании индексного критерия dBAI, полученного по данным спутника «Landsat-8», наблюдается обратная закономерность). Максимальные значения критериев dNDVI, dNBR характерны для территории, пострадавшей от лесного пожара. Среднеквадратическое отклонение показателей dNDVI, dNBR также имеет более высокие значения для выгоревшей территории. При определении статистически значимых показателей индексных критериев учитывалось, что они в основном имеют пороговое значение, близкое к разности между средним значением и среднеквадратическим отклонением. Полученные данные использовались в моделях геообработки (табл. 2).

Таблица 2

**Значения индексных критериев (dNBR, dNDVI, dBAI)
для лесных земель и территории, пострадавшей от лесного пожара,
на основе космических снимков «Sentinel-2» и «Landsat-8»**

Table 2

**Values of index criteria (dNBR, dNDVI, dBAI)
for forest lands and areas affected by forest fire,
based on «Sentinel-2» and «Landsat-8» satellite images**

Индексные критерии	Снимки «Sentinel-2»				Снимки «Landsat-8»			
	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратическое значение	Среднее значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Среднеквадратическое значение
<i>Лесные земли</i>								
dNBR	0,005	–0,248	0,932	0,060	0,013	–0,623	0,303	0,023
dNDVI	0,023	–0,188	0,700	0,043	0,006	–0,066	0,254	0,023
dBAI	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$4,8 \cdot 10^{-7}$	$-4,1 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$
<i>Территория, пострадавшая от лесного пожара</i>								
dNBR	0,296	–0,196	0,932	0,151	0,121	0,010	0,303	0,048
dNDVI	0,222	–0,116	0,700	0,128	0,127	0,010	0,254	0,035
dBAI	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	$-2,2 \cdot 10^{-5}$	$-4,1 \cdot 10^{-5}$	$-2,0 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-6}$

Для автоматизированного дешифрирования сельскохозяйственных земель использован космический снимок «Sentinel-2» за 5 апреля 2020 г., так как за счет более высокого пространственного разрешения результат классификации будет более точным, чем в случае применения снимка «Landsat-8». Сельскохозяйственная освоенность исследуемой территории достаточно низкая (около 13,4 %), что обусловлено преобладанием песчаных и гидроморфных почв, характеризующихся более низким баллом кадастровой оценки.

Участки, соответствующие двум или трем индексным критериям и расположенные на сельскохозяйственных землях (в окрестностях аг. Стодоличи и д. Усов), не относятся к выгоревшей территории. На основе анализа космических снимков «Landsat-8» эти участки занимают 340,8 га, а на основе анализа космических снимков «Sentinel-2» – 97,5 га (рис. 6).

Таким образом, общая площадь лесного пожара на территории Гребеневского лесничества (к югу от д. Запесочное Лельчицкого района) по данным спутника «Sentinel-2» составила 654,0 га, а по данным спутника «Landsat-8» – 706,3 га. Для количественной оценки точности выполнено пространственное пересечение между векторными слоями, полученными на основе представленной методики, и результатом визуального дешифрирования на дату 10 апреля 2020 г. Анализ данных показал, что площадь территории, пострадавшей от лесного пожара, более точно определена на основе снимков «Sentinel-2», чем на основе снимков «Landsat-8».

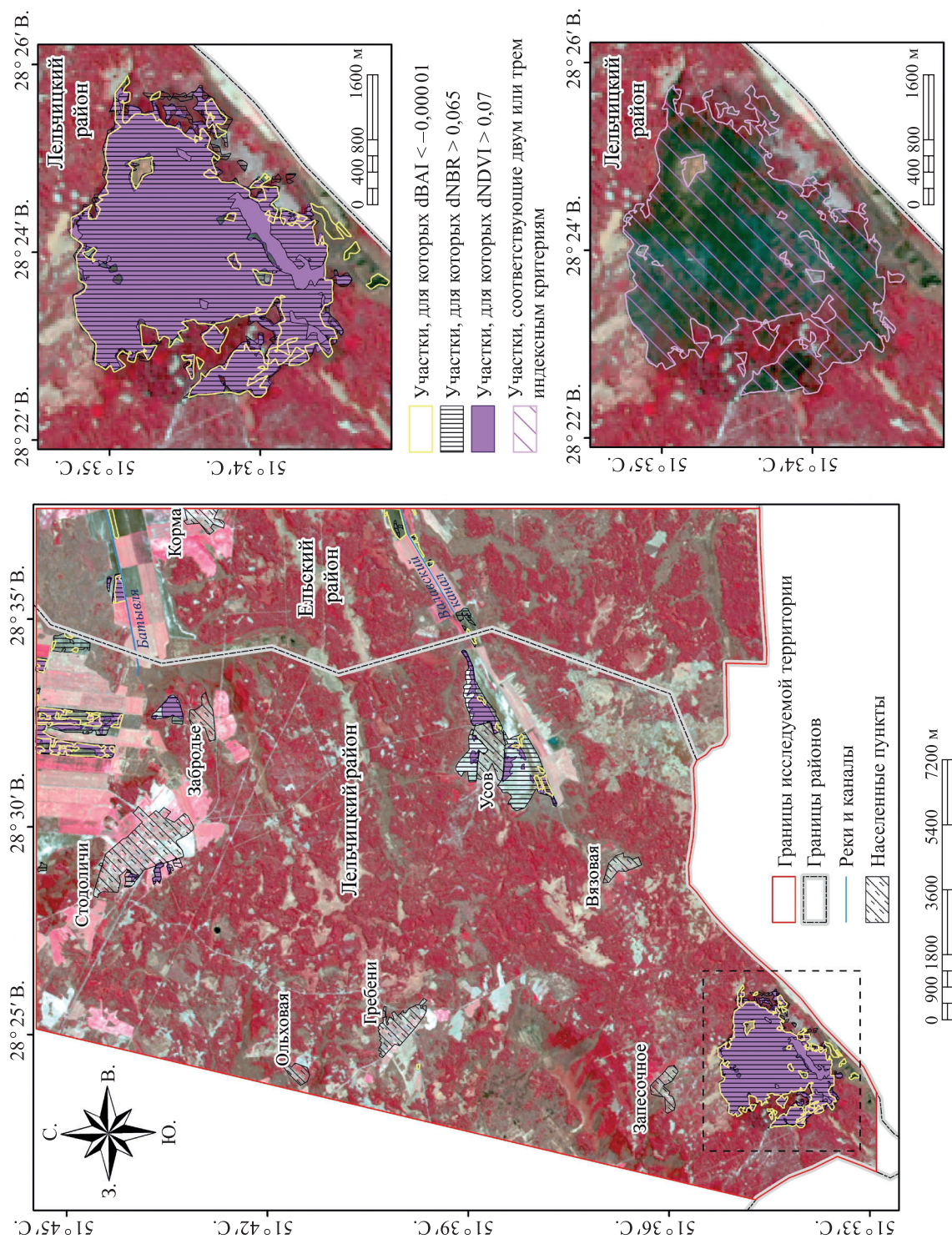


Рис. 4. Карта расположения участков, выбранных на основе разницы индексов NBR, NDVI, BAI за период с 25 марта по 10 апреля 2020 г. по космическим снимкам «Landsat-8»

Fig. 4. Map of the location of areas selected based on the difference in NBR, NDVI, BAI indices for the period from 25 March to 10 April 2020 based on «Landsat-8» satellite images

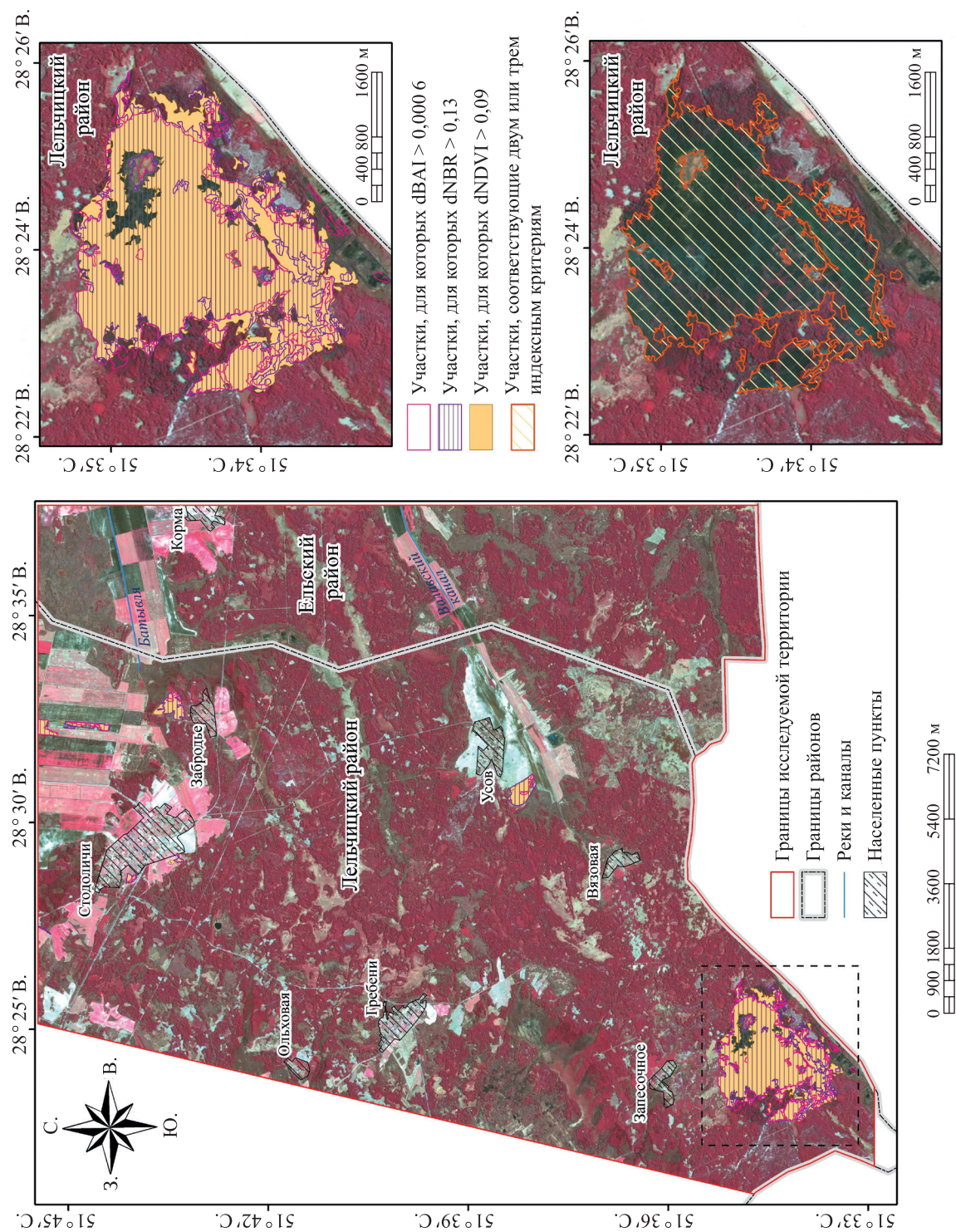


Рис. 5. Карта расположения участков, выбранных на основе разницы индексов NBR, NDVI, BAI за период с 5 по 10 апреля 2020 г. по космическим снимкам «Sentinel-2»

Fig. 5. Map of the location of areas selected based on the difference in NBR, NDVI, BAI indices for the period from 5 to 10 April 2020 based on «Sentinel-2» satellite images

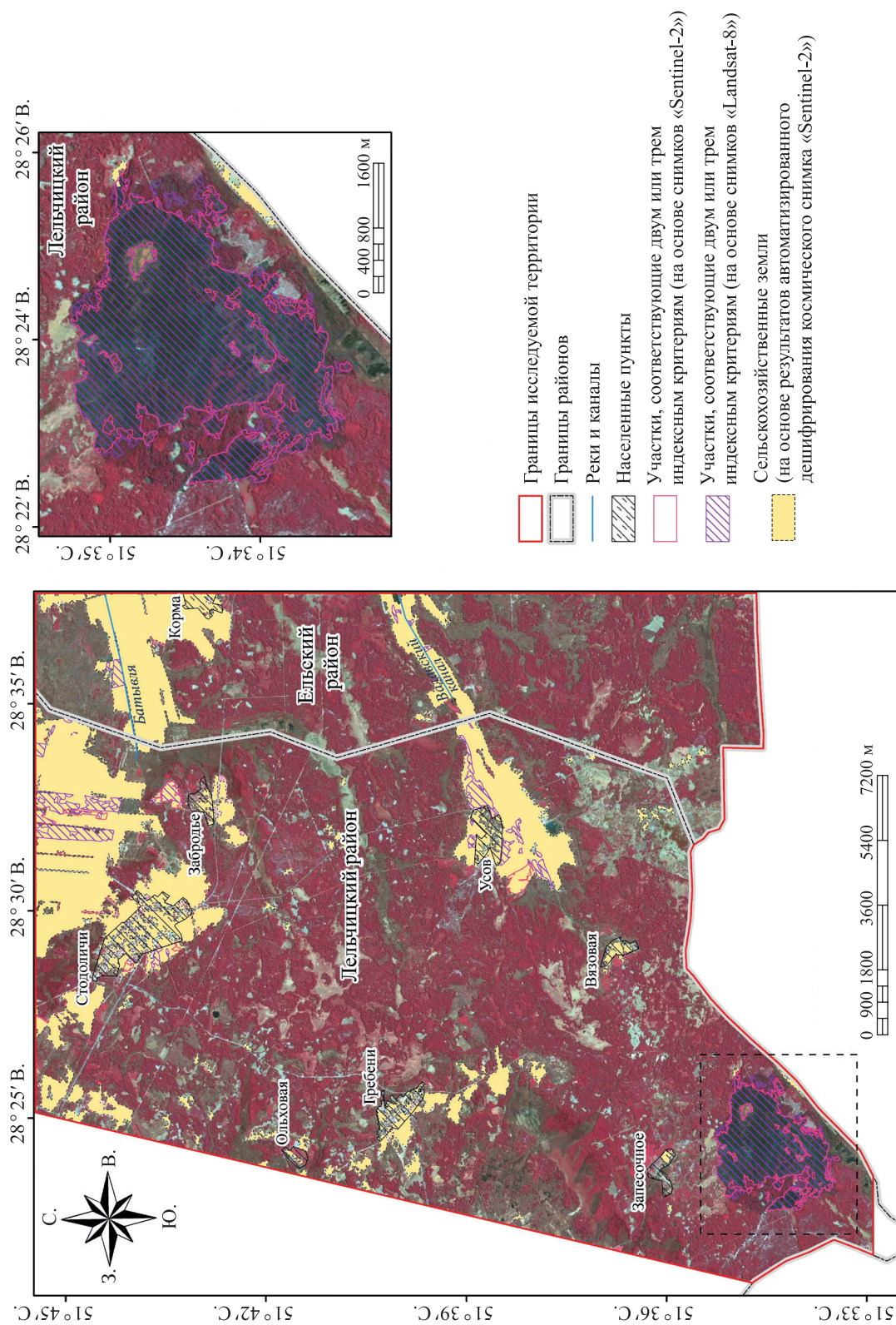
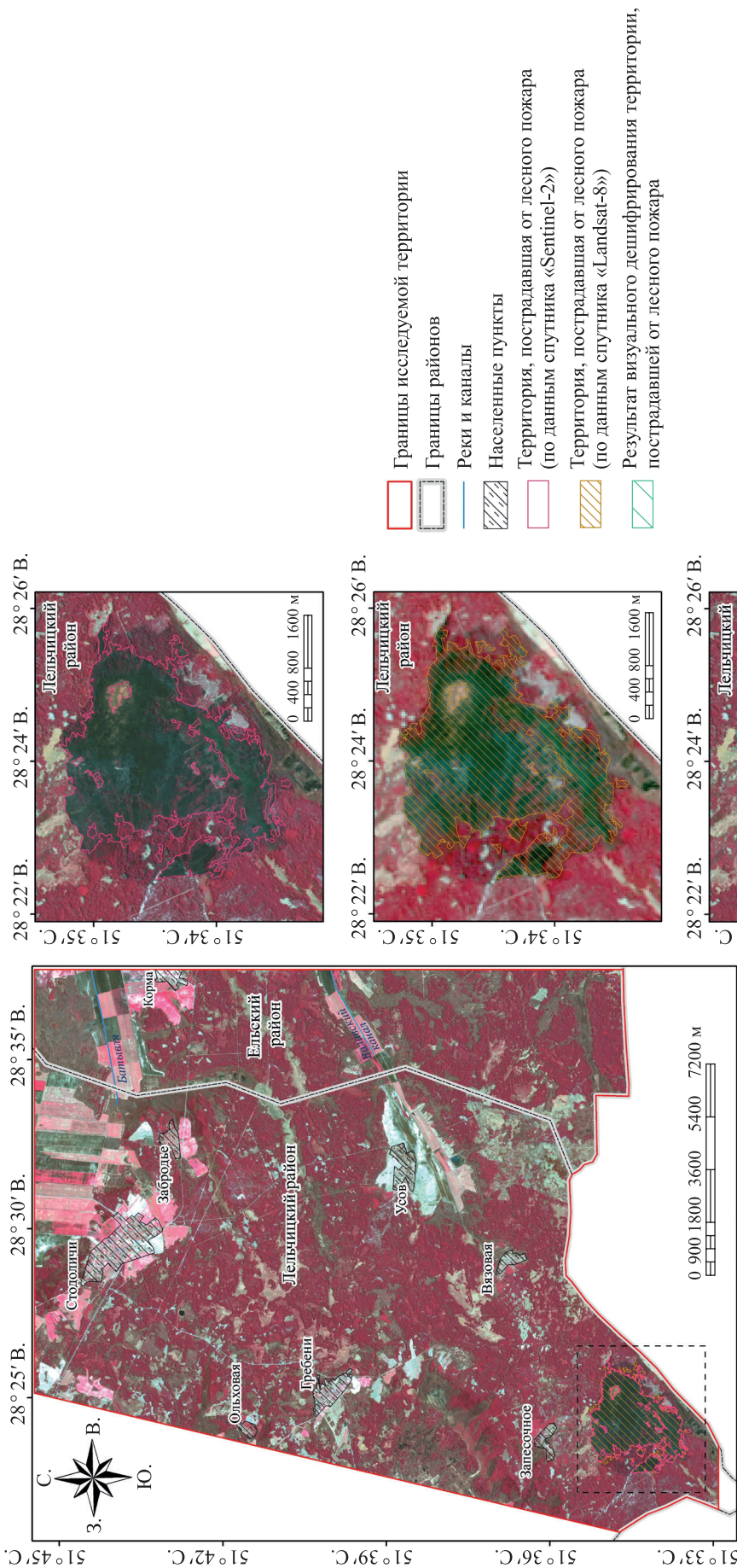


Рис. 6. Расположение участков, соответствующих двум или трем индексным критериям (на основе снимков «Sentinel-2» и «Landsat-8»), и отображение контуров сельскохозяйственных земель (согласно результатам автоматизированного дешифрирования космического снимка «Sentinel-2» и «Landsat-8») в пределах исследуемой территории составила 4556 га)

Fig. 6. Location of areas corresponding two or three index criteria (based on «Sentinel-2» and «Landsat-8») satellite images and display of contours of agricultural lands (according to the automated decryption of the «Sentinel-2» satellite image, the total area of agricultural land within the study area was 4556 ha)



Площадь территории Гребеневского лесничества, пострадавшей от лесного пожара

На основе космических снимков «Sentinel-2»	На основе космических снимков «Landsat-8»	На основе результатов визуального дешифрирования космического снимка «Sentinel-2»
654,0 га	706,3 га	646,2 га

Рис. 7. Карта последствий лесного пожара на территории Гребеневского лесничества по данным космических снимков «Sentinel-2» и «Landsat-8» за 10 апреля 2020 г.
Fig. 7. Map of the consequences of a forest fire on the territory of the Grebenevsky forestry based on «Sentinel-2» and «Landsat-8» satellite images for 10 April 2020

Общая площадь выгоревшей территории, рассчитанная с помощью визуального дешифрирования космического снимка «Sentinel-2», составила около 646 га. Площадь территории, пострадавшей от лесного пожара, по данным снимков «Sentinel-2» на 3,2 %, а по данным снимков «Landsat-8» на 10,7 % превысила результат визуального дешифрирования (см. рис. 7).

При использовании представленной методики для космических снимков «Sentinel-2» точность составила более 96 %, а при ее использовании для космических снимков «Landsat-8» – более 89 %, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности методики.

Следует отметить, что в рамках данной методики проанализировано применение ГИС-технологий для использования информации о земельном покрове при получении итогового результата, что позволяет удалить участки, которые соответствуют индексным критериям, но являются контурами пахотных и луговых земель, и в итоге более достоверно идентифицировать выгоревшую территорию.

Заключение

Анализ индексных критериев dNBR, dNDVI, dBAI по разновременным космическим снимкам «Landsat-8» и «Sentinel-2» (до и после пожара) позволяет выявить статистически значимые изменения уровня вегетации для природных экосистем. Полученная информация может использоваться для идентификации лесных пожаров, но при этом следует учитывать даты съемки для более точного определения характера динамики индексов за вегетационный период. Для расчета разницы спектральных индексов NBR, NDVI, BAI могут применяться различные программные продукты, поэтому эти данные используются в качестве исходной информации для первой созданной в среде ModelBuilder модели геообработки, которая позволяет установить статистически значимые показатели индексных критериев и выполнить их комплексную обработку. Результатом применения данной модели является векторный слой участков, соответствующих двум или трем индексным критериям. Во второй модели геообработки осуществляется контролируемая классификация для выделения контуров сельскохозяйственных земель, пространственная информация о которых используется при уточнении идентификации выгоревшей территории. Вследствие более высокого пространственного разрешения итоговые результаты, полученные на основе космических снимков «Sentinel-2», имеют более высокую точность, чем итоговые результаты, полученные на основе космических снимков «Landsat-8» (около 96 и 89 % соответственно).

Таким образом, ГИС-технологии заметно увеличивают скорость обработки пространственных данных, а также вычисления статистических данных при анализе спектральных индексов и позволяют в значительной степени автоматизировать картографирование выгоревших территорий. Учитывая, что результаты использования индексных критериев dNBR, dNDVI, dBAI имеют некоторые различия при идентификации территории, пострадавшей от лесного пожара, применение их сочетаний способствует уменьшению вероятных погрешностей.

Библиографические ссылки

1. Brown DG, Goovaerts P, Burnicki A, Li M-Y. Stochastic simulation of land-cover change using geostatistics and generalized additive models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002;68(10):1051–1061.
2. Hansen MC, Loveland TR. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment*. 2012;122:66–74. DOI: 10.1016/j.rse.2011.08.024.
3. Heydari SS, Mountrakis G. Effect of classifier selection, reference sample size, reference class distribution and scene heterogeneity in per-pixel classification accuracy using 26 Landsat sites. *Remote Sensing of Environment*. 2018;204:648–658. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.035.
4. Thanh Noi P, Kappas M. Comparison of random forest, k-nearest neighbor, and support vector machine classifiers for land cover classification using Sentinel-2 imagery. *Sensors*. 2018;18(1):18. DOI: 10.3390/s18010018.
5. Wu Q, Li H, Wang R, Paulussen J, He Y, Wang M, et al. Monitoring and predicting land use change in Beijing using remote sensing and GIS. *Landscape and Urban Planning*. 2006;78(4):322–333. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.10.002.
6. Kennedy RE, Townsend PA, Gross JE, Cohen WB, Bolstad P, Wang YQ, et al. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sensing of Environment*. 2009;113(7):1382–1396. DOI: 10.1016/j.rse.2008.07.018.
7. Mitchell BR, Shriver WG, Dieffenbach F, Moore T, Faber-Langendoen D, Tierney G, et al. *Northeast Temperate Network vital signs monitoring plan*. Woodstock: National Park Service, Northeast Temperate Network; 2006. 102 p. Report No.: NPS/NER/NRTR-2006/059.
8. Potere D, Woodcock CE, Schneider A, Ozdogan M, Baccini A. Patterns in forest clearing along the Appalachian Trail corridor. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007;73(7):783–791. DOI: 10.14358/PERS.73.7.783.
9. Wessels KJ, De Fries RS, Dempewolf J, Anderson LO, Hansen AJ, Powell SL, et al. Mapping regional land cover with MODIS data for biological conservation: examples from the Greater Yellowstone Ecosystem, USA and Pará State, Brazil. *Remote Sensing of Environment*. 2004;92(1):67–83. DOI: 10.1016/j.rse.2004.05.002.
10. Wilkinson DW, Parker RC, Evans DL. Change detection techniques for use in a statewide forest inventory program. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2008;74(7):893–901. DOI: 10.14358/PERS.74.7.893.

11. Alcaras E, Costantino D, Guastaferro F, Parente C, Pepe M. Normalized burn ratio plus (NBR+): a new index for Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*. 2022;14(7):1727. DOI: 10.3390/rs14071727.
12. Guo R, Yan J, Zheng H, Wu B. Assessment of the analytic burned area index for forest fire severity detection using Sentinel and Landsat data. *Fire*. 2024;7(1):19. DOI: 10.3390/fire7010019.
13. Chowdhury RR. Driving forces of tropical deforestation: the role of remote sensing and spatial models. *Singapore Journal of Tropical Geography*. 2006;27(1):82–101. DOI: 10.1111/j.1467-9493.2006.00241.x.
14. Воробьев ОН, Курбанов ЭА, Лежнин СА, Полевщикова ЮА, Демишева ЕН. Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014;11(4):217–229. EDN: TJELAL.
15. Барталев СА, Стыщенко ФВ, Егоров ВА, Лупян ЕА. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров. *Лесоведение*. 2015;2:83–94. EDN: TOASFX.
16. Груммо ДГ. Ретроспективный анализ динамики природных пожаров на территории Беларуси на основе данных дистанционного зондирования. *Природные ресурсы*. 2022;1:112–125.
17. Гусев АП, Филончик НН, Шпилевская НС. Многолетние тренды состояния растительности в природных и антропогенных ландшафтах Белорусского Полесья по данным MODIS (2000–2019). *Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2020;6(3):200–209. EDN: LTXDZM.
18. 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. DOI: 10.33581/2521-6740-2022-1-57-70.
19. Бондур ВГ, Цидилина МН, Черепанова ЕВ. Космический мониторинг воздействия природных пожаров на состояние различных типов растительного покрова в федеральных округах Российской Федерации. *Исследование Земли из космоса*. 2019;3:13–32. DOI: 10.31857/S0205-96142019313-32.
20. Галерея индексов ArcGIS Pro [Интернет]. 2024 [процитировано 15 апреля 2024 г.]. Доступно по: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/latest/help/data/imagery/indices-gallery.htm>.
21. Черепанов АС. Вегетационные индексы. *Геоматика*. 2011;2:98–102. EDN: STYTLN.
22. Груммо ДГ, Судник АВ, Байчоров ВМ, Вершицкая ИН, Вознячук ИП, Грищенкова НД и др. *Наземные и дистанционные методы оценки состояния экосистем особо охраняемых природных территорий*. Груммо ДГ, Судник АВ, редакторы. Минск: Белорусская наука; 2023. 351 с.
23. Chuvieco E, Martín MP, Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*. 2002;23:5103–5110. DOI: 10.1080/01431160210153129.

Получена 18.05.2024 / исправлена 05.08.2024 / принята 18.09.2024.
Received 18.05.2024 / revised 05.08.2024 / accepted 18.09.2024.