

<https://doi.org/10.25686/10.25686.2022.44.54.009>

УДК 630*432.1:528.8 (470.57)

ВЫЯВЛЕНИЕ ПОЖАРООПАСНЫХ ЛЕСНЫХ УЧАСТКОВ ВБЛИЗИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Г.Е. Одинцов, И.Г. Сабирзянов, А.К. Габделхаков, З.З. Рахматуллин
Башкирский государственный аграрный университет

Рассмотрены теоретические и практические аспекты применения данных ДЗЗ и ГИС–технологий вместе с полевыми исследованиями при определении наиболее пожароопасных лесных участков, непосредственно примыкающих к населенным пунктам. Проанализировано состояние данного вопроса в трудах отечественных и зарубежных ученых. Выполнен анализ динамики лесных пожаров на территории Республики Башкортостан за 10–летний период с целью определения территорий, подверженных из года в год лесным пожарам. Разработана методика использования космического снимка со спутника Sentinel–2 для определения классов пожарной опасности земель лесного фонда, расположенных вокруг села Сафарово Учалинского района Республики Башкортостан. Использованы специализированные спектральные индексы: нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI), а также комбинация каналов «искусственные цвета» для оценки санитарного состояния древесно–кустарниковой растительности на исследуемом объекте. Использование комбинации каналов спутникового снимка «искусственные цвета» позволило дистанционно определить санитарное состояние насаждений, что подтвердилось полевыми исследованиями на пробных площадях. Использование нормализованного относительного индекса растительности (NDVI) как инструмента для мониторинга древесно–кустарниковой растительности позволило выделить такие участки на исследуемом объекте, которые имеют низкую биологическую продуктивность и несут опасность при возникновении лесных пожаров. Использование нормализованного разностного водного индекса (NDWI) при оценке пожарной опасности позволило определить наличие влаги в растительном покрове. Чем выше значение NDWI, тем выше увлажненность, в то время как низкое значение указывает на водный стресс. Составлена тематическая лесная карта с присвоением классов природной пожарной опасности на основе проведенных исследований. Предложены рекомендации на основе использования данных дистанционного зондирования Земли и ГИС–технологий для прогноза возникновения лесных пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, пожароопасные лесные участки, земли лесного фонда, Sentinel–2, NDVI, NDWI.

DETECTION OF FIRE-PRONE FORESTS IN CLOSE PROXIMITY TO POPULATED AREAS

G.E. Odintsov, I.G. Sabirzianov, A.K. Gabdelkhakov, Z.Z. Rakhmatullin

Bashkir State Agrarian University

The paper addresses theoretical and practical aspects of detecting fire-prone forest regions located in close proximity to human settlements using remote sensing data, GIS, and field data. The authors comprehensively summarised the previous research conducted by domestic and foreign scholars. The dynamics of forest fires on the territory of the Republic of Bashkortostan were analysed over a 10-year period in order to detect the regions that are affected by forest fires year over year. A method for determining the fire hazard classes of forest areas located near the settlement of Safarovo in the Uchalinsky region of the Republic of Bashkortostan has been developed using a Sentinel-2 satellite image. Specialized spectral indices were used: the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Normalized Difference Water Index (NDWI), as well as a combination of "artificial color" bands to assess the condition of trees and shrubs in the

area under study. The use of "artificial colors" in satellite image bands enabled remote determination of the sanitary condition of stands, which was validated with field data. The use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) as a tool for monitoring tree and shrub vegetation made it possible to identify such areas that have low biological productivity and are fire-prone. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in assessing fire hazards made it possible to determine the presence of moisture in the vegetation cover. A high NDWI value indicates high moisture content, whereas a low value indicates water stress. As a result of research, a thematic forest map has been developed to indicate classes depending on the natural fire hazard. The authors make recommendations based on the use of Earth remote sensing data and GIS technologies for forecasting forest fires.

Keywords: forest fires, natural fire hazard forest areas, forest stands, Sentinel-2, NDVI, NDWI.

Введение

Устойчивость лесов к лесным пожарам с каждым годом снижается из-за изменений температурного режима и засушливого климата, что нередко приводит к смене древесных видов. С лесными пожарами можно справиться с помощью надлежащих стратегий управления, таких как устойчивое управление лесами. Тщательный мониторинг лесных насаждений, в том числе с использованием данных ДЗЗ и ГИС-технологий – один из таких инструментов, который может помочь в эффективном управлении лесами (Mansoor et al., 2022).

Лесные пожары – стихийные бедствия, создающие значительный риск для сообществ, проживающих в непосредственной близости от лесного ландшафта (Большая российская энциклопедия). Они представляют собой серьезное естественное нарушение для большинства лесных экосистем по всему миру (Kurbanov et al., 2022). Количество лесных пожаров и ущерб от них в последние десятилетия только возрастают, ежегодно на земном шаре они охватывают 10–15 млн га (Большая российская энциклопедия).

Современные методы дистанционного зондирования содержат в себе потенциал для мониторинга динамических изменений не только древесно-кустарниковой растительности, но и водного баланса (El-Gamily et al., 2010; El-Bastawesy et al., 2015; Kurbanov et al., 2020). Нормализованный разностный водный индекс (NDWI) первоначально рассчитывался с использованием канала NIR (ближнего инфракрасного излучения) и зеленого канала со снимков спутников Landsat, которые могут дополнять характеристики определения наличия влаги в растительном покрове. В 2006 году был предложен новый расчёт индекса NDWI (Xu et al., 2006) путем замены среднего инфракрасного канала на канал NIR. Нормализованный разностный индекс воды (NDWI) — это метод, который был создан для разграничения объектов открытой воды, а также наличия влаги в растительном покрове дистанционным зондированием. NDWI получают из каналов NIR (ближнего инфракрасного) и SWIR (коротковолнового инфракрасного) NDWI (Xu et al., 2006). NDWI также используется для картирования водно-болотных угодий, мониторинга засухи (Ouma et al., 2006; NDWI (Xu et al., 2006; Воробьев, Курбанов, 2021). NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) обычно используется для оценки изменений в динамике растительности и ее корреляции с различными климатическими факторами, особенно с температурой и осадками, которые считаются наиболее важными факторами, влияющими на растительный покров (Chu et al., 2013; He et al., 2015).

Цель работы – Апробация методики определения наиболее пожароопасных лесных участков на основе данных дистанционного зондирования Земли и ГИС–технологий.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

- подобрать участок на территории земель лесного фонда с использованием свободной базы данных космических снимков со спутника Sentinel–2;
- провести натурные обследования на выбранном участке путём глазомерно–измерительной таксации;
- соотнести данные полевых исследований с данными, полученными при дешифрировании спутникового снимка исследуемого участка в программной среде ArcGIS;
- составить тематическую лесную карту с легендой классов природной пожарной опасности на основе проведенных исследований.

Область исследования

Объект исследования – земли лесного фонда, расположенные вокруг села Сафарово Учалинского района Республики Башкортостан (рис. 1).

Район исследования относится к лесостепной зоне Южно-Уральского лесостепного района и расположен в пределах Ургунского и Учалинского сельского участковых лесничеств Учалинского лесничества Республики Башкортостан (рис. 1). Доминирующими типами растительности данного лесного участка являются насаждения березы повислой злаковой группы типов лесов.



Рис. 1. Объект исследования (снимок со спутника Google)

Материалы и методика исследований

Для оценки пожарной опасности в лесах были использованы специализированные спектральные индексы: нормализованный относительный индекс растительности (NDVI), нормализованный разностный водный индекс (NDWI), а также комбинация каналов

«искусственные цвета» (для оценки санитарного состояния древесно-кустарниковой растительности) состояла из двух этапов: полевые и камеральные работы.

Нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) позволяет выделить участки с зеленой биомассой и является инструментом для мониторинга растительности. Чем выше значение индекса, тем больше растительности на исследуемой территории, так как он отражает влияние таких факторов, как содержание хлорофилла, площадь листовой поверхности, сомкнутость и структура растительного покрова, что хорошо коррелирует с индексом фотосинтетически активной радиации и индексом листовой поверхности (LAI) (Пушкин и др., 2015; 2016). Наличие и объемы фитомассы как проводника горения зависят также от типа лесорастительных условий, различающихся между собой по степени плодородия и увлажнения почв. В связи с этим используются другие вегетационные индексы, которые отражают не только наличие хлорофилла в растениях, но и влаги, а также наличие лигнина и целлюлозы.

По исследованиям многих авторов (Ruokolainen et al., 2009; Chu et al., 2013; Chowdhury et al., 2015), сильная связь между количеством пожаров и сроком их возникновения наблюдается при использовании спектральных индексов, учитывающих влажность, например, индекса влагосодержания NDWI. Наиболее характерной для данного индекса является сильная связь между значениями этого индекса и пожароопасной обстановкой для территорий с определенными типами растительности, так как, например, участки с преобладанием лиственных пород, а также участки старых гарей. Индекс NDWI при оценке пожарной опасности используется для определения наличия влаги в растительном покрове. Более высокие значения NDWI говорят о достаточную увлажненности, в то время как низкое значение указывает на водный стресс.

Определение лесной пожарной опасности предусматривает установление конкретных классов пожароопасности для отдельных участков земель лесного фонда на основе векторных тематических слоев индексов NDVI и NDWI. Если значение индекса на участке больше его среднеарифметического значения (для NDWI – меньше), то такому участку присваивается один условный балл пожарной опасности (Пушкин и др., 2015; 2016). Участки, набравшие большую сумму баллов, характеризуются наивысшей пожарной опасностью (Черепанов и др., 2009).

В качестве исходного снимка для отработки методики оценки пожарной опасности был использован снимок со спутника Sentinel-2 L1C, сцена S2B_MSIL1C_20200718T070619_N0209_R106_T40UFF_20200718T091854, дата съемки 18.07.2020. Снимок был загружен с портала Географической службы США (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) (рис. 2).

Спутниковый снимок перед использованием в исследовании был подвергнут предварительной обработке в пакете ArcGIS 10.5.

Методика оценки лесной пожарной опасности на основе использования материалов космической съемки включает проведение следующих этапов:

- предварительная обработка тематических растров спектральных индексов, полученных в результате классификации;
- векторизация тематических растров спектральных индексов;
- определение лесной пожарной опасности.

Этап определения классов лесной пожарной опасности предусматривает последовательное выполнение следующих процедур:

- сравнение средних значений индексов NDVI, NDWI с их значениями по отдельным участкам, полученным в результате классификации, и определение классов пожарной опасности данных участков;
- интерполяция полученных значений классов пожарной опасности участков в пределах границ таксационных выделов (лесных кварталов).



Рис. 2. Спутниковый снимок объектов исследования в естественных цветах

Результаты исследования

В Республике Башкортостан в лесном фонде за последние 10 лет ликвидированы лесные пожары в количестве 1577 шт., на общей площади 24574,2 га (табл. 1). Наибольшая площадь лесных пожаров составила 11636 га и пришлась на аномально жаркий 2010 год. С 2011 по 2021 год ситуация с лесными пожарами относительно стабилизировалась (табл. 1).

Таблица 1

Динамика лесных пожаров в Республике Башкортостан за период с 2011 по 2021 год

№ п/п	Годы	Динамика горений	Площади лесов, пройденные огнём, га	Усреднённая площадь одного возгорания, га
1	2011	80	478	6,0
2	2012	220	1564,3	7,11
3	2013	60	126,3	2,1
4	2014	49	185,5	3,8
5	2015	43	162,5	3,8
6	2016	147	976,8	6,6
7	2017	38	354,5	9,3
8	2018	144	903,0	6,3
9	2019	160	2232,8	13,9
10	2020	165	3726,0	22,6
11	2021	471	15245,6	32,4
Итого		1497	24574,2	16,4

Однако в 2021 году противопожарная обстановка имела тенденцию к дестабилизации. Если средняя площадь одного возгорания составляла за последние 10 лет 16,4 га, то этот показатель в 2021 году возрос до 32,4 га. Среди территорий тридцати одного лесничества в этот год относительно большее число пожаров наблюдалось в Учалинском лесничестве, где зафиксировано 54 лесных возгораний на площади 524 га, средней площадью 9,7 га. Это почти 12 % всех пожаров в лесах в границах Республики Башкортостан в 2021 году.

Ежедневная пожарная опасность в лесу зависит от множества факторов. Прежде всего от лесорастительных условий на лесных участках и условий погоды, от времени года, от активности граждан в посещении лесов. В разное время года, различная растительность имеет различное фенологическое состояние. В разных районах и в разные периоды сезона связь между погодой и уровнем ежедневной пожарной опасности всегда имеет различия, зачастую очень существенные, так как различаются комплексы остальных факторов пожарной опасности. Большинство возникающих в весеннее время лесных пожаров в лесничестве связано с преобладанием в живом напочвенном покрове злаковых видов. Весной с началом схода снежного покрова эти прошлогодние отмершие растения под весенними лучами подсыхают и становятся в пожарном отношении горимыми. Погодные условия, в частности жаркие и бездождевые дни способствуют созреванию лесных горючих материалов.

По данным информационной системы дистанционного мониторинга «Рослесхоз» нами проанализирована динамика зависимости количества лесных пожаров по датам и величине комплексных показателей пожарной опасности по погодным условиям за период с 2011 по 2021 год. За исследуемый период большинство лесных пожаров в весенний период в лесничестве возникали при значениях комплексного показателя 1001 и выше, в летний период при значениях 4001 и выше (рис. 2). В пожароопасном сезоне 59 % всех возгораний приходится на весеннее время, 32 % – на лето, 9 % – на осень. Диапазон значений комплексного показателя, при которых наблюдались возгорания, находится в пределах от 570 до 15809.

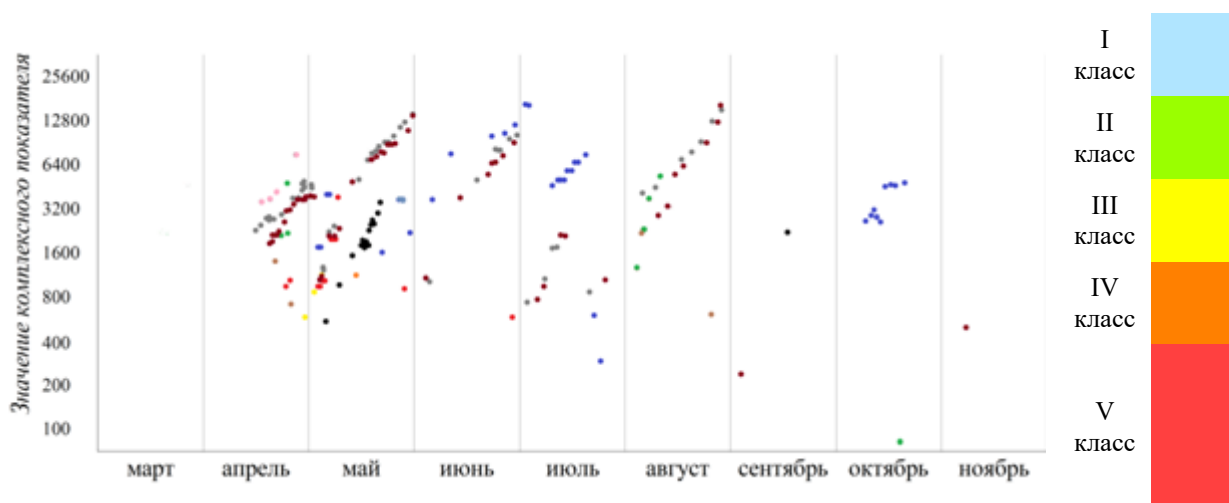


Рис. 2. Динамика распределения количества лесных пожаров по датам и величине комплексных показателей пожарной опасности по погодным условиям за период с 2011 по 2021 год

По классификатору пожарной опасности по лесорастительным условиям относительно наиболее опасными в пожарном отношении являются хвойные молодняки и сухостойные деревья. Однако наиболее горимыми они становятся с их постепенным созреванием в пожарном отношении, то есть с увеличением их сухости.

Оценка спектральных индексов строго по материалам космической съемки является одним из основных этапов, позволяющим определить значения показателей лесных

насаждений с низкой биологической продуктивностью и наличием влаги, влияющих на степень пожарной опасности лесной территории и связанных с растительностью, влажностью и температурой.

В работе на основе дешифрирования снимков составлены схемы, позволяющие выявить наиболее пожароопасные лесные участки (рис. 3–5).

Таблица 2

Информация, получаемая при комбинации каналов (Костикова, 2005)

Комбинация спектральных каналов Sentinel-2	Потенциальная информация о наземном покрове
8, 4, 3	Стандартная комбинация «искусственные цвета». Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – зелено-голубых, а цвет почвы варьируется от темно- до светло-коричневого. Лёд, снег и облака выглядят белыми или светло-голубыми (лёд и облака по краям). Хвойные леса будут выглядеть более темно-красными или даже коричневыми по сравнению с лиственными. Эта комбинация очень популярна и используется главным образом для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, а также для изучения агрокультур. В целом насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую или редколесья/кустарниковую растительность.



Рис. 3. Сцена Sentinel-2 (NIR, Red и Green) на исследуемую площадь

В пожароопасный сезон важно иметь представление о санитарном состоянии насаждений. Для этого можно использовать комбинации каналов спутниковых снимков. Например, комбинация «искусственные цвета». Благодаря ей мы провели санитарную оценку насаждений вокруг с. Сафарово Учалинского района Республики Башкортостан. Насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) мелколиственной растительности. Чем светлее оттенок, тем соответственно насаждение является менее здоровым. На данном этапе важно исключить участки с наличием молодняков и кустарниковой растительностью. Расстроенные, отмирающие и сильно поврежденные древостои являются крайне опасными в течение всего пожароопасного сезона.

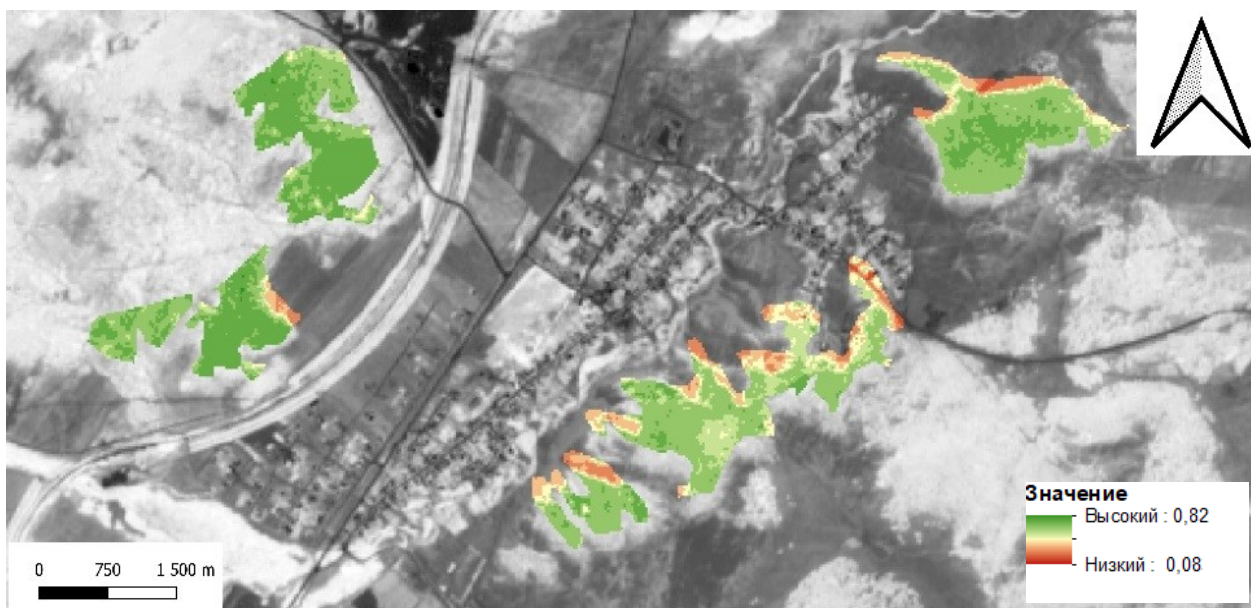


Рис. 4. Индекс NDVI на исследуемой площади

В целом насаждения вокруг населённого пункта имеют значения индекса в пределах 0,08 - 0,82. На участках, отмеченных желтым и красными цветами, он составляет 0,5-0,6, что говорит о том, что насаждения постепенно теряют свою биологическую продуктивность и могут нести опасность при возникновении лесных пожаров.

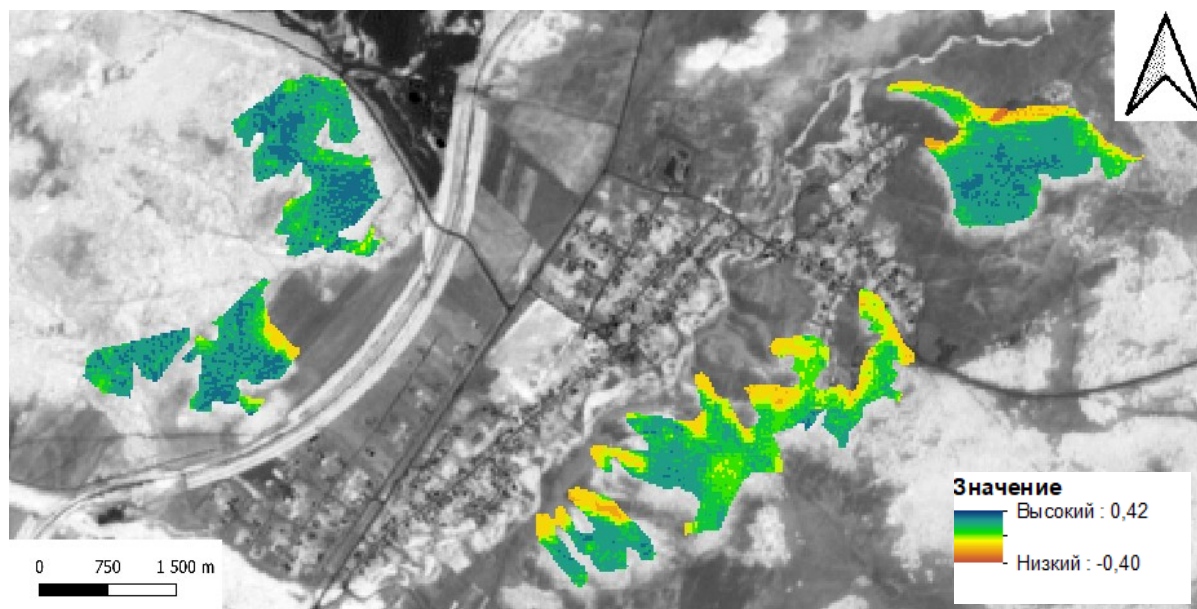


Рис. 5. Индекс NDWI на исследуемой площади

Индекс NDWI для насаждений составил значения в пределах -0,40-0,42. Желтым и коричневым цветом выделены участки с отрицательным значением NDWI, что говорит о низком содержании влаги в горючих лесных материалах. Указанные насаждения будут иметь более высокий класс пожарной опасности. В результате каждому выделу или лесному кварталу присваивается один преобладающий по площади индексный класс пожарной

опасности. На основе этой классификации была составлена тематическая лесная карта с присвоением классов природной пожарной опасности, представленная на рисунке 6.

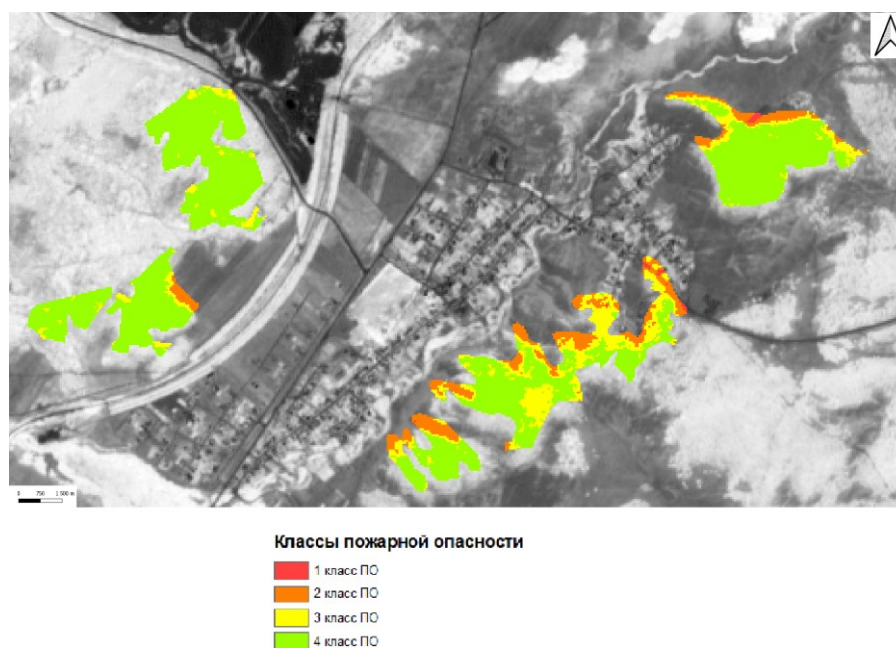


Рис. 6. Тематическая карта распределения лесных насаждений по классам пожарной опасности по материалам космической съемки Sentinel-2

Заключение

Использование ГИС-технологий позволяет выделить наиболее пожароопасные лесные участки, примыкающие к населенным пунктам, а также лучше определить и уточнить приоритетные области защиты. Эта карта может быть использована для установки пунктов размещения противопожарного инвентаря и прокладки минерализованных полос. Помимо этого, улучшению противопожарной обстановки способствовали ряд кардинальных мероприятий в лесном ведомстве региона, которые в первую очередь связаны с все большим использованием для мониторинга пожарной опасности и лесных пожаров дистанционного мониторинга лесов с применением данных спутниковой информации, использования квадрокоптеров для определения границ очагов пожаров и интенсивности горения.

Применение данных дистанционного зондирования Земли и современных ГИС-технологий позволило оценить лесные насаждения вблизи с. Сафарово Учалинского района Республики Башкортостан по классам пожарной опасности и выделить среди них наиболее пожароопасные участки. Составление подобных карт в будущем поможет при разработке и проведении мероприятий по противопожарному обустройству территорий, прилегающих к населённым пунктам и контролировать состояние насаждений во избежание повышения их пожароопасного состояния.

Библиографический список

1. Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://bigenc.ru/>. – 08.11.2022.
2. Волокитина А. В., Софронова Т. М., Корец М. А. Региональные шкалы оценки пожарной опасности в лесу: усовершенствованная методика составления // Сибирский лесной журнал. 2017. № 2. С. 52–61. DOI: 10.15372/SJFS20170206

3. Воробьев О.Н., Курбанов Э.А. Оценка затопления растительного покрова в республиках Марий Эл и Чувашия при подъеме Чебоксарского водохранилища до отметки 68 м по данным ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, № 3. С. 214-225. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225.
4. Костикова А. Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+ [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>. – 08.11.2022.
5. Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах. Минск: БГТУ, 2015. №1(174). С. 36-40.
6. Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В. Спектральные индексы для оценки пожарной опасности лесов по материалам космической съемки с использованием ГИС-технологий в условиях рационального природопользования // Биоэкономика и экобиополитика. 2016. №1(2). С. 163-170.
7. Черепанов А.С., Дружинина Е.Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы // Геоматика. 2009. №3. С. 28-32.
8. Chowdhury E.H., Hassan Q.K. Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data // Remote Sensing. 2015. 7(3). 2431-2448. DOI: 10.3390/rs70302431.
9. Chu H., Venevsky S., Wu C., Wang M. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015 // Sci of the Total Env. 2019. 650: 2051-2062.
10. Chu T., Guo X. Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in Boreal Forest regions: A review // Remote Sensing. 2013. 6(1). 470-520. DOI: 10.3390/rs6010470.
11. El-Bastawesy M.E. Hydrological scenarios of the Renaissance Dam in Ethiopia and its hydro-environmental impact on the Nile downstream // J. of Hydro Eng. 2015. 20(7): 04014083 DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001112.
12. El-Gamily I.H., Selim G., Hermas E.A. Wireless mobile field-based GIS science and technology for crisis management process: A case study of a fire event, Cairo, Egypt // The Egypt. J. of Rem. Sen. Spa. Sci. 2010. 13(1): 21-29.
13. He B., Chen A., Wang H., Wang Q. Dynamic response of satellite-derived vegetation growth to climate change in the Three North Shelter Forest Region in China // Rem Sen. 2015. 7(8): 9998-10016.
14. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S., Sha J., Wang J., Li X., Cole J., Dergunov D., Wang Y. Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: a review // Remote Sensing. 2022. Vol. 14, № 19. 4714. <https://doi.org/10.3390/rs14194714>.
15. Kurbanov E., Vorobiev O., Sha J., Li X., Gitas I., Minakou C., Gabdelkhakov A., Martynova M. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17, № 5. С. 9-20. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-20.
16. Mansoor S. Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change // Journal of Environmental Management. 2022, Jan 1;301:113769. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113769.
17. Ouma Y.O., Tateishi R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data // Int Jour Rem Sen. 2006. 27: 3153-3181.
18. Ruokolainen L., Salo K. The effect of fire intensity on vegetation succession on a sub-xeric health during ten years after wildfire // Annales Botanici Fennici. 2009. 46(1). 30-42. DOI: 10.5735/085.046.0103.
19. Xu H.Q. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Int. J. of Rem. Sen. 2006. 27: 3025-3033.

References

1. Bol'shaya rossiiskaya entsiklopediya (Great Russian Encyclopedia) [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://bigenc.ru/>. – 08.11.2022.
2. Volokitina A. V., Sofronova T. M., Korets M. A. Regional'nye shkaly otsenki pozharnoi opasnosti v lesu: usovershenstvovannaya metodika sostavleniya (Regional Forest Fire Hazard Rating Scales: An Improved Compilation Method). *Sibirskii lesnoi zhurnal*. 2017. № 2. S. 52-61. DOI: 10.15372/SJFS20170206
3. Vorob'ev O.N., Kurbanov E.A. Otsenka zatopleniya rastitel'nogo pokrova v respublikakh Marii El i Chuvashiya pri pod"eme Cheboksarskogo vodokhranilishcha do otmetki 68 m po dannym DZZ (Estimation of flooding of the vegetation cover in the Republics of Mari El and Chuvashia during the rise of the Cheboksary reservoir to the level of 68 m according to remote sensing data). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. Т. 18, № 3. С. 214-225. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-214-225.
4. Kostikova A. Interpretatsiya kombinatsii kanalov dannykh Landsat TM / ETM+ (Interpretation of Landsat TM / ETM+ data channel combinations) [Elektronnyi resurs]. Rezhim dostupa: <https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html>. – 08.11.2022.
5. Pushkin A.A., Sidel'nik N.Ya., Kovalevskii S.V. Ispol'zovanie materialov kosmicheskoi s"emki dlya otsenki pozharnoi opasnosti v lesakh (Using space imagery materials to assess fire hazard in forests). Минск: БГТУ, 2015. №1(174). С. 36-40.

6. Pushkin A.A., Sidel'nik N.Ya., Kovalevskii S.V. Spektral'nye indeksy dlya otsenki pozharnoi opasnosti lesov po materialam kosmicheskoi s"emki s ispol'zovaniem GIS-tekhnologii v usloviyakh ratsional'nogo prirodopol'zovaniya (Spectral Indices for Assessing the Fire Hazard of Forests Based on Space Imagery Using GIS Technologies under the Conditions of Rational Nature Management). *Bioekonomika i ekobiopolitika*. 2016. №1(2). S. 163-170.
7. Cherepanov A.S., Druzhinina E.G. Spektral'nye svoistva rastitel'nosti i vegetatsionnye indeksy (Spectral properties of vegetation and vegetation indices). *Geomatika*. 2009. №3. S. 28-32.
8. Chowdhury E.H., Hassan Q.K. Development of a New Daily-Scale Forest Fire Danger Forecasting System Using Remote Sensing Data. *Remote Sensing*. 2015. 7(3). 2431-2448. DOI: 10.3390/rs70302431.
9. Chu H., Venevsky S., Wu C., Wang M. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015. *Sci of the Total Env*. 2019. 650: 2051-2062.
10. Chu T., Guo X. Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in Boreal Forest regions: A review. *Remote Sensing*. 2013. 6(1). 470–520. DOI: 10.3390/rs6010470.
11. El-Bastawesy M.E. Hydrological scenarios of the Renaissance Dam in Ethiopia and its hydro-environmental impact on the Nile downstream. *J. of Hydro Eng*. 2015. 20(7): 04014083 DOI:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001112.
12. El-Gamily I.H., Selim G., Hermas E.A. Wireless mobile field-based GIS science and technology for crisis management process: A case study of a fire event, Cairo, Egypt. *The Egypt. J. of Rem. Sen. Spa. Sci*. 2010. 13(1): 21-29.
13. He B., Chen A., Wang H., Wang Q. Dynamic response of satellite-derived vegetation growth to climate change in the Three North Shelter Forest Region in China. *Rem Sen*. 2015. 7(8): 9998-10016.
14. Kurbanov E., Vorobev O., Lezhnin S., Sha J., Wang J., Li X., Cole J., Dergunov D., Wang Y. Remote sensing of forest burnt area, burn severity, and post-fire recovery: a review. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 19. 4714. <https://doi.org/10.3390/rs14194714>.
15. Kurbanov E., Vorobiev O., Sha J., Li X., Gitas I., Minakou C., Gabdelkhakov A., Martynova M. A survey on the use of GIS and remote sensing for sustainable forestry and ecology in Russia and China. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. T. 17, № 5. S. 9–20. 10.21046/2070-7401-2020-17-5-9-20.
16. Mansoor S. Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*. 2022, Jan 1;301:113769. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113769.
17. Ouma Y.O., Tateishi R. A water index for rapid mapping of shoreline changes of five East African Rift Valley lakes: an empirical analysis using Landsat TM and ETM+ data. *Int Jour Rem Sen*. 2006. 27: 3153–3181.
18. Ruokolainen L., Salo K. The effect of fire intensity on vegetation succession on a sub-xeric health during ten years after wildfire. *Annales Botanici Fennici*. 2009. 46(1). 30–42. DOI: 10.5735/085.046.0103.
19. Xu H.Q. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. of Rem. Sen*. 2006. 27: 3025–3033.