

Научная статья
УДК 528
doi: 10.17223/25421379/35/12

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ, ГИС И СПУТНИКОВЫХ СНИМКОВ



Галина Прокопьевна Стручкова¹, Тамара Афанасьевна Капитонова²,
Татьяна Георгиевна Крупнова³, Сардана Алексеевна Тихонова⁴,
Лина Егоровна Тарская⁵, Ольга Викторовна Ракова⁶

^{1, 2, 4, 5} ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
СО РАН, Якутск, Россия

^{3, 6} Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

¹ pandoramy8@list.ru

² kapitonova@iptpn.ysn.ru

³ krupnovatg@susu.ru

⁴ sardankobeleva@gmail.com

⁵ lina.tarskaya@mail.ru

⁶ rakovaov@susu.ru

Аннотация. Лесные пожары являются одним из грозных стихийных бедствий, представляющих опасность для жизни и здоровья людей, для бесперебойного функционирования важных промышленных объектов, приводящих к огромным ущербам при поражении природных и хозяйственных систем. Для предотвращения и тушения пожаров важно иметь возможность определять места, где складываются критические условия для опасности возгорания и находятся важные объекты, которые подвергаются наибольшему риску по экологическим, физическим или социально-экономическим причинам. Целью исследования является оценка потенциальной опасности возникновения пожаров, используя статистические методы, ГИС и ДДЗЗ.

Ключевые слова: космические снимки, лесные пожары, картографирование, статистические методы, ГИС, байесовское моделирование веса доказательств

Источники финансирования: работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 1023030900073-8-2.3.3, научная тема FWRS -2024-0032) и при поддержке Российского научного фонда № 24-27-20095.

Для цитирования: Стручкова Г.П., Капитонова Т.А., Крупнова Т.Г., Тихонова С.А., Тарская Л.Е., Ракова О.В. Картографирование потенциальной опасности лесных пожаров с использованием статистических методов, ГИС и спутниковых снимков // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 154–164. doi: 10.17223/25421379/35/12

Original article
doi: 10.17223/25421379/35/12

MAPPING THE POTENTIAL DANGER OF FOREST FIRES USING STATISTICAL METHODS, GIS AND SATELLITE IMAGES

Galina P. Struchkova¹, Tamara A. Kapitonova², Tatyana G. Krupnova³,
Sardana A. Tikhonova⁴, Lina E. Tarskaya⁵, Olga V. Rakova⁶

^{1, 2, 4, 5} Yakutsk Scientific Center, SB RAS, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North, SB RAS,
Yakutsk, Russia

^{3, 6} South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

¹ pandoramy8@list.ru

² kapitonova@iptpn.ysn.ru

³ krupnovatg@susu.ru

⁴ sardankobeleva@gmail.com

⁵ lina.tarskaya@mail.ru

⁶ rakovaov@susu.ru

Abstract. Forest fires are one of the main natural disasters that cause huge damage to natural resources, threaten people's lives and the safety of important industrial facilities. (LP)

In order to prevent and extinguish fires, it is extremely important to be able to identify places where critical conditions for a fire hazard develop and important facilities are located that are most at risk for environmental, physical or socio-economic reasons. Currently, researchers both in Russia and abroad often use remote sensing to study the mechanisms of forest fires in various ecosystems.

The purpose of this study is to assess the territory of the Verkhoyansky ulus site according to the degree of risk of forest fires using statistical methods, GIS and DDZ. Based on archival data on forest fires in Yakutia for 2017–2021, satellite images from Landsat satellites for May, June, July, August 2017–2021, Terra (ASTER) 2013 after performing radiometric and atmospheric correction, the values of spectral indices and terrain parameters were calculated. As a result of the analysis of historical data on forest fires, a research site was selected to study the state of plant communities. This study presents an analysis of the impact of landscape and anthropogenic factors on forest fires using the Bayesian WOE evidence weight model, which consists of a statistical model of the spatial relationship between actual LP cases and the presence or absence of predictors that represent landscape conditions and anthropogenic influence. WOE models are built for binary classification, where the presence or absence of fires throughout the site is used to calculate the weight (evidence) of the importance of each category of predictive/explanatory factors (predictors). The main assumption of the WOE method is that future events (fire incidents) are more likely to occur in areas with conditions similar to those that contributed to past events. Geospatial data sets were processed and analyzed, and maps of potential fire hazard for the site were created, combining several thematic layers. The effectiveness of the model was evaluated using the ROC-AUC method, which showed that the WOE model classifies the territory quite well (accuracy up to 76 %) according to the level of fire hazard. Timely, adequate assessment of the danger of a forest fire and mapping of areas of potential fire danger are important and necessary to determine the scope of preventive fire-fighting measures and effective fire extinguishing actions.

Keywords: satellite images, forest fires, mapping, statistical methods, GIS, Bayesian modeling of the weight of evidence

Sources of financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. 1023030900073-8-2.3.3, scientific theme FWRS -2024-0032 and Russian Science Foundation project 24-27-20095).

For citation: Struchkova G.P., Kapitonova T.A., Krupnova T.G., Tikhonova S.A., L.E. Tarskaya, Rakova O.V. (2025) Mapping the potential danger of forest fires using statistical methods, GIS and satellite images. *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 154–164. (In Russian). doi: 10.17223/25421379/35/12

Введение

В последние годы для моделирования вероятности возникновения пожаров был разработан ряд методов, в которых используются преимущества дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и географических информационных систем (ГИС) [Павличенко и др., 2004; Hernandez-Lea et al., 2006; Peterson et al., 2013; Huesca et al., 2014; Курганович и др., 2015; Пушкин и др., 2015; Chowdhury et al., 2015; Сидельник и др., 2018; Mohajane et al., 2021; Peinl, 2021; Yaron et al., 2021; Wu et al., 2022; Стручкова и др., 2023]. Эти методы обычно предполагают, что условия, которые привели к возникновению пожаров в недавнем и более отдаленном прошлом, вероятно, продолжают вызывать пожары и в будущем. Таким образом, пространственное расположение мест возникновения пожаров (архивные данные мониторинга лесных пожаров (ЛП)), а также различные факторы, связанные с районами возгорания, обычно являются наиболее важными входными переменными для этих методов. Для решения этой сложной проблемы все большее число ученых проводят исследования различными методами [Dlamini, 2010; Jaafari et al., 2018; Hong et al., 2019; Стручкова и др., 2023; Ju et al., 2023; Rivière et al., 2023].

В данной работе подход заключался в том, чтобы связать события, связанные с пожарами, с набором

предикторных переменных, которые характеризуют особенности окружающей среды в пределах исследуемой территории, такие как рельеф и состояние растительности, с учетом влияния деятельности человека.

Суровый климат и природные условия в Якутии, служат причиной большого количества пожаров на ее территории, среднее число которых превышает в 2 раза среднее число пожаров по России. По данным Департамента лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), 15 из 131 млн га зеленого леса не смогли восстановиться после пожара [Протопопова и др., 2017]. В регионах с вечной мерзлотой, из-за замедления процессов разложения, в лесах накапливается большое количество растительного опада, что может стать одной из причин пожаров при условии засушливой, жаркой погоды. Разновидности напочвенных горючих материалов определяют пирологические зоны растительного покрова территорий, влияющие на его пожароопасность. Усиление или снижение горимости в основном связано с количеством осадков и температурой воздуха. Из-за этого в условиях Якутии, особенно в труднопроходимых районах, крайне трудно предотвратить появление и распространение лесных пожаров на больших площадях. На возрождение растительности после пожара требуется 50 лет, а уровень вечной мерзлоты нормализуется намного дольше. [Протопопова и др., 2017].

Известно, что самыми частыми причинами возникновения пожаров являются летние «сухие грозы» (более 60 %) и антропогенный фактор (около 40 %).

Как российскими, так и зарубежными исследователями были разработаны разнообразные методы, формулы и показатели, в которых пожарная опасность оценивается с помощью метеорологических данных, а потенциальная возможность пожара – через запасы лесных горючих материалов и влагосодержание растительности. В России массово применяется комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова, представленный в 1940-е гг. [Нестеров и др., 1968], а также его разновидности, предусматривающие данные атмосферы, количество осадков и скорость ветра. В зарубежных странах используют видоизмененный показатель В.Г. Нестерова с учетом дневных поправок на осадки и скорость ветра – индекс PORT, а также индексы пожароопасности, как FFDM в Австралии, ICONA в Испании, IMP1 в Италии, полученные по модели Мак Артура и включающие температуру, влажность воздуха, скорость ветра и уклон местности [Bovio et al., 1984], индексы, которые отображают суточное изменение влажности почв и лесного массива – канадский FWI [Yaron et al., 2021], финский FMI [Chowdhury et al., 2015].

Глобальное потепление климата повышает риск засухи и губительных природных пожаров в Сибири [Кузнецов, 2009]. Сложное, многофакторное взаимодействие между погодой, климатом, рельефом, состоянием растительности и лесными пожарами обуславливает актуальность исследований возникновения лесных пожаров [Белоусова и др., 2016]. Согласно статистическим данным Федеральной службы государственной статистики субъектов Дальневосточного федерального округа, большие лесные массивы

Республики Саха (Якутия) насчитывают 2,5 % мировых и около 11 % запасов лесных ресурсов России. Площадь леса в Якутии от общей площади составляет 51 %, в том числе хвойные леса 84,4 % [Латышева и др., 2021].

Область исследования

В исследовании использовались данные метеорологических спутников NOAA (США) с сайта Института космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН (https://ikfia.ysn.ru/new/phoroom/files/lgi/files/hotspots_overview_map.html). Сделана обработка и систематизация данных мониторинга, разработка и наполнение базы данных лесных пожаров на территории Республики Саха Якутия за 2017–2021 гг., изучены исторические данные по пожарам за выбранный промежуток, проанализированы и выбраны районы для работы. Из проанализированного распределения природных пожаров для глубокого изучения был избран Верхоянский район, где отмечено наибольшее число возгораний.

Краткая характеристика исследуемой области

Выбор участка исследования *Верхоянского улуса* был сделан на основании анализа распределения очагов природных пожаров за 2017–2021 гг. В этом регионе максимальное количество пожаров. Кроме того, на территории исследуемого участка находится Батагайская нефтебаза, имеющая важнейшее значение для снабжения топливом арктических регионов. В последние годы в летние месяцы нефтебаза часто находится в режиме повышенной готовности из-за сложной ситуации с природными пожарами (рис. 1).



Рис. 1. Фотография лесных пожаров

В июле 2020 г. огонь находился в 300 м от Батагайской нефтебазы

Fig. 1. Photos of forest fires

In July 2020, the fire was located 300 meters from the Batagai oil depot

Верхоянский район расположен на севере Якутии, относится к Яно-Колымской лесопожарной области, Верхоянско-Черскому северотаежному округу с резко континентальным климатом и низкой плотностью населения (0,1 чел. км²). Участок находится в долине, обрамленной с трех сторон горными хребтами, и открыт с северной стороны, что способствует низким зимним температурам. Средние зимние температуры находятся в интервале $-38...-48$ °С, летние – в интервале $+15...+17$ °С. Количество осадков в год составляет от 150 до 300 мм (https://xn--h1ajim.xn--p1ai/%D0%92%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%83%D0%BB%D1%83%D1%81).

Объекты и методы исследования

При оценке пожароопасности лесов использовались данные дистанционного зондирования Земли из бесплатных источников: Landsat8-OLI (earthexplorer.usgs.gov), снимки спутника Terra (сканер Aster) (https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html).

По результатам космического мониторинга в работе исследованы крупные природные пожары в пределах Якутии, которые произошли с 2017 по 2021 г. Были использованы космические снимки со спутника Landsat8-OLI, летний период (июнь, июль, август с 2017 по 2021 г.), а также для рельефа использовались космические изображения со спутника Terra (сканер Aster) 2013 г.

Далее в ГИС была сделана обработка данных, с помощью которой проведен пространственный анализ выявленных пожаров и создана база данных природных пожаров, которые произошли в районе Якутии. Анализ результатов работ по природным пожарам показал, что антропогенный фактор имеет большое влияние на пожароопасность. В данной работе мы попытались учесть влияние антропогенного фактора через переменные «Расстояние пожаров от дорог» и «Расстояние от населенных пунктов».

На основе предыдущих исследований, обзора литературы, характеристик мест возникновения пожаров и доступных данных в качестве объясняющих переменных для моделирования подверженности лесным пожарам в этом исследовании были выбраны следующие факторы: тематические изображения вегетационных индексов (NDVI, NDWI и PSRI), крутизна склона, экспозиция склона, высота, а также добавлены два фактора – «близость от дорог» и «близость от населенных пунктов» (рис. 2).

NDVI (Нормализованный индекс растительности) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы (обычно называемый вегетационным индексом). Индекс имеет значения от -1 до 1 .

Значения индекса для растительности лежат в диапазоне от $0,2$ до $0,8$. Далее мы переклассифицировали растры на пять классов по степени риска возгорания.

Нормализованный разностный водный индекс NDWI. Является индексом для определения и мониторинга изменений содержания поверхностных вод в растительном покрове. Он вычисляется с использованием ближнего инфракрасного (NIR) и зеленого канала. Значения индекса NDWI чувствительны к изменению влажности. Индекс выводит значения между -1 и 1 . Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от $-0,1$ до $0,4$. Вода имеет значения от $0,2$ до 1 , объекты, не содержащие влагу, принимают значения меньше 0 . Далее была сделана переклассификация на пять классов по степени риска возгорания.

PSRI индекс содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы разработан для учета общего количества «сухого» углерода в виде лигнина и целлюлозы. Такой углерод в больших количествах присутствует в древесине и в мертвых или сухих растительных тканях. Увеличение этих показателей отражает процессы «старения» и исчезновения растений.

Высота. Карта высот была получена, используя снимки спутника Terra (сканер Aster). Затем растровые слои были переклассифицированы на пять подгрупп, используя классификацию методом естественных интервалов в ArcGIS по степени опасности пожара.

Крутизна склона. Растровые слои склонов были определены с помощью ЦМР в инструменте генерации склонов в ArcGIS. Затем карта крутизны склона была переклассифицирована на пять подгрупп, используя классификацию в ArcGIS по степени риска возгорания.

Экспозиция склонов. Интенсивность поступающей солнечной радиации выше на восточных, южных, юго-восточных и юго-западных склонах, что может влиять на условия возникновения возгорания, скорость перемещения пожара. Для того, чтобы учесть влияние инсоляции на опасность возникновения лесных пожаров, необходимо использовать фактор экспозиции склона, полученный используя соответствующий инструмент ArcGis. Затем растр был переклассифицирован на пять классов по степени риска возгорания.

Расстояние от дорог. Для определения расстояния от дорог использовался алгоритм евклидова расстояния из spatial analyst toolbox в ArcGIS. Затем растр был переклассифицирован на пять классов для подготовки тематического слоя удаленности от дорог. Наивысшей категории (т.е. ближайшему расстоянию от дороги) присвоена оценка 5 , тогда как низшей категории (т.е. наибольшему расстоянию от дороги) – оценка 1 , что указывает на очень высокий и очень низкий риск ЛП соответственно.

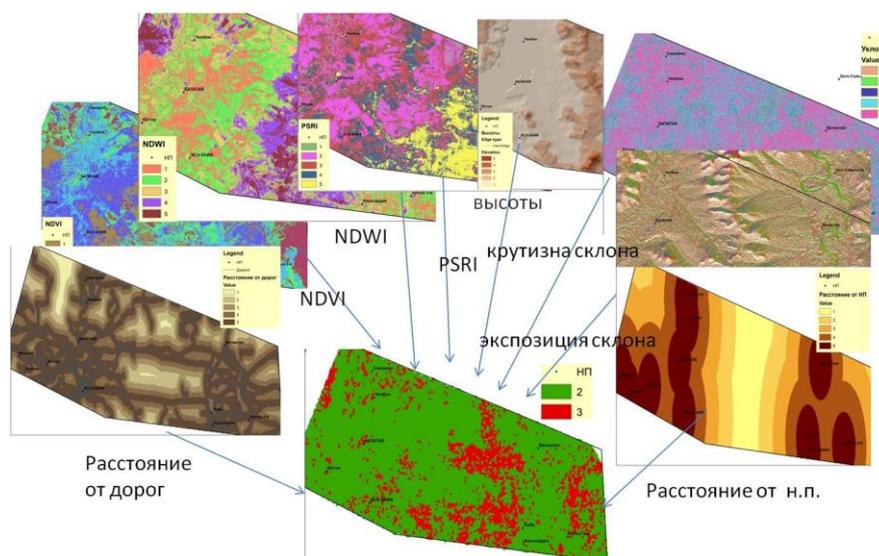


Рис. 2. Факторы, обуславливающие возникновения ЛП в исследуемом районе

NDVI – показатель состояния растительного покрова; NDWI – показатель увлажненности растительного покрова; PSRI – показатель наличия сухостоя; высота над уровнем моря, расстояние от дорог; расстояние от населенных пунктов; экспозиция склона, крутизна склона

Fig. 2. Factors causing the occurrence of LP in the studied area

NDVI – an indicator of the state of vegetation cover; NDWI – an indicator of the moisture content of vegetation cover; PSRI – an indicator of the presence of dead wood; altitude above sea level, distance from roads; distance from settlements; aspect; slope

Расстояние от населенных пунктов. Для определения расстояния от населенного пункта использовался алгоритм евклидова расстояния из spatial analyst toolbox в Arc GIS. Затем растр был переклассифицирован на пять классов для подготовки тематического слоя удаленности от населенного пункта. Наивысшей категории (т.е. ближайшему расстоянию от населенного пункта) присвоена оценка 5, тогда как низшей категории (т.е. наибольшему расстоянию от населенного пункта) – оценка 1, что указывает на очень высокий и очень низкий риск ЛП соответственно.

Значения классов после переклассификации растровых слоев в порядке усиления степени риска наводнений приведены в табл. 1.

Для создания карты потенциальной пожароопасности использовались следующие предикторы: состояние и степень увлажненности растительного покрова, наличие сухостоя, тематические слои высот, крутизна склона и экспозиция склона, близость от дорог и населенных пунктов. Определение классов потенциальной опасности лесного пожара выполнялось на основе комбинации полученных тематических слоев, используя инструменты Spatial Analyst Overlay analysis, Взвешенное наложение. Веса растров были определены методом байесовского веса доказательств (WOE).

Методы

Метод байесовского веса доказательств (WOE). Для исследования пространственной взаимосвязи между историческими событиями, связанными с пожарами и факторами, обуславливающими возникновения ЛП [Bonham-Carter, 1994] была использована модель веса доказательств. Обучающий набор точек был представлен 70 % общего количества ЛП, оставшиеся 30 % ЛП использовались для валидации.

В контексте моделирования лесных пожаров модели WOE построены для бинарной классификации, где наличие или отсутствие пожаров по всему участку используется для расчета веса (доказательств) важности каждой категории прогностических/объясняющих факторов (предикторов). Основное допущение метода WOE заключается в том, что будущие события (случаи возгорания) с большей вероятностью произойдут в районах с условиями, аналогичными тем, которые способствовали прошлым событиям [Jaafari et al., 2015]. Таким образом, вероятность возникновения инцидента с возгоранием при наличии переменной-предиктора определяется условной вероятностью [Bonham-Carter, 1994].

Модель основана на логарифмически-линейной форме правила Байеса.

Значения классов после переклассификации растровых слоев в порядке усиления степени риска пожароопасности

Table 1

The values of the classes after the reclassification of raster layers in order of increasing the degree of fire hazard

Класс пожароопасности	NDVI	NDWI	PSRI	Расстояние от дорог, км	Расстояние от НП, км	Высоты, м	Крутизна склона, °	Экспозиция склона
1 (очень низкая)	0,14–0,33	–0,06–0,18	–0,13–(–0,08)	2,04–2,55	1,56–2,35	150–300	0–37	СЗ, С (292,5–360)
2 (низкая)	0,09–0,14	–0,14–(–0,06)	–0,08–(–0,07)	1,53–2,04	1,04–1,56	300–450	37–56	СВ, С (0–67,5)
3 (средняя)	0,04–0,09	–0,21–(–0,14)	–0,07–(–0,05)	1,02–1,53	0,63–1,04	450–600	56–70	З (247,5–292,5)
4 (высокая)	–0,03–0,04	–0,27–(–0,21)	–0,05–(–0,03)	0,51–1,02	0,31–0,63	600–750	70–80	ЮЗ, Ю (157,5–247,5)
5 (очень высокая)	–0,13–(–0,03)	–0,99–(–0,27)	–0,03–0,05	0–0,51	0–0,31	750–900	80–90	ЮВ, В (67,5–157,5)

Теорему Байеса можно записать в виде

$$P\left(\frac{A}{B}\right) = \frac{P(B/A) \cdot P(A)}{P(B)}. \quad (1)$$

Таким образом, вероятность наступления некоторого события A , учитывая, что событие B уже произошло, $P(A|B)$, равна вероятности наступления события B , учитывая, что событие A произошло, $P(B|A)$, умноженной на вероятность наступления события A , $P(A)$, и деленной на вероятность наступления события B , $P(B)$. Этот метод вычисляет вес для каждого фактора, предсказывающего ЛП (B), на основе наличия или отсутствия случаев ЛП в пределах области [Bonham-Carter, 1994] следующим образом:

$$W^+ = \ln\left(\frac{P\{V/F\}}{P\{\bar{V}/\bar{F}\}}\right). \quad (2)$$

$$W^- = \ln\left(\frac{P\{\bar{V}/F\}}{P\{V/\bar{F}\}}\right), \quad (3)$$

где P – вероятность, а \ln – натуральный логарифм; V – наличие потенциального фактора ЛП, \bar{V} – отсутствие потенциального фактора, способствующего ЛП, F – наличие точки ЛП, \bar{F} – отсутствие ЛП.

W_i^{++} и W_i^- дают безразмерную меру уровня корреляции между возгораниями и каждой категорией бинарных переменных. Точнее, W_i^+ присваивает веса наличию возгораний в определенной категории переменных-предикторов и количественно определяет величину положительной корреляции. Напротив, W_i^- дает веса для отсутствия возгораний в пределах определенной категории предикторных переменных, а величина веса указывает на отрицательную корреляцию между возгоранием и предикторной переменной [Jaafari et al., 2018]. В этом контексте важно помнить, что апостериорные вероятности, апостериорные коэффициенты и веса отражают наблюдаемые пропорции площадей, занятых соответствующими событиями/условиями. Оценка доказательств, основанная на

их различиях (S^2), приведена в [Bonham-Carter, 1994]:

$$S^2(W^+) = \frac{1}{N\{V \cap F\}} + \frac{1}{N\{\bar{V} \cap \bar{F}\}}, \quad (4)$$

$$S^2(W^-) = \frac{1}{N\{\bar{V} \cap F\}} + \frac{1}{N\{V \cap \bar{F}\}}. \quad (5)$$

Разница между двумя весами известна как контраст весов, $C = W^+ - W^-$. Этот контраст отражает общую пространственную связь между возгоранием и любой конкретной категорией предикторных переменных [Jaafari et al., 2015]. Дисперсия контраста ($S^2(C)$) и студентизированный контраст (WF), который является конечным весом любой конкретной категории предикторных переменных, рассчитываются с использованием следующих уравнений:

$$S = \sqrt{(S^2(W^+) + S^2(W^-))}. \quad (6)$$

$$WF = C/S, \quad (7)$$

где $S(C)$ – стандартное отклонение контраста.

После вычисления весовых коэффициентов категорий вес предиктора рассчитывается с суммированием. В среде ГИС баллы рассчитываются путем объединения весов со слоями пространственных данных для каждого показателя.

Возникновение и поведение лесных пожаров зависят от факторов окружающей среды, таких как состояние, наличие сухостоя и влагосодержание растительности, высота, крутизна склона, экспозиция склона, а также от антропогенных факторов, таких как наличие близости населенных пунктов, дорог и видов деятельности.

Проверка на взаимозависимость предикторов (мультиколлинеарность). Мультиколлинеарность существует, когда две или более предикторных переменных имеют высокую корреляцию, что может привести к менее точной оценке влияния независимой переменной на зависимую, чем когда независимые

переменные некоррелированы друг с другом. Критические значения VIF (коэффициент инфляции дисперсии) > 5 указывают на потенциальную проблему с мультиколлинеарностью. Для данной работы коэффициенты инфляции дисперсии (VIF) находятся в интервале 1–1,15. Предикторы «расстояние от дорог», «расстояние от населенных пунктов», «высота» – 1,15, остальные –1.

Результаты и их обсуждение

Анализ полученных результатов показал: какие предикторы и какие категории внутри каждой предикторной переменной были тесно связаны с возникновением лесных пожаров. В результате использования ГИС, данных ДЗЗ, фактических данных по пожарам за 2017–2021 гг. и статистических методов построена карта пожароопасности участка Верхоянского улуса (см. рис. 2).

Вес доказательств (WOE). Учитывая, что более высокие значения WF указывают на более высокий уровень значимости для конкретной категории переменных [Jaafari et al., 2015], было получено, что вклад различных классов аспекта, индекса $PSRI$, уклона в возникновении пожаров был несущественным при исследовании каждой прогностической переменной отдельно (табл. 2).

Наиболее важный показатель с точки зрения веса был определен как «индекс состояния растительности $NDVI$ » 0,379, следующими по важности предикторами были определены «индекс содержания влаги в растительности $NDWI$ » 0,197, «крутизна склона» 0,155, расстояние от дорог» 0,140; далее по уровню значимости слои $PSRI$, «высота» «расстояние от населенных пунктов» имеют значения 0,048; 0,038; 0,036 соответственно. Наименьший вклад в опасность возгорания вносит фактор – инсоляции – «экспозиция склона» 0,005.

Частота возникновения пожаров для всех предикторов рассчитывалась как отношения доли пожаров,

зарегистрированных в различных категориях каждого предиктора, на соответствующие этим категориям доли площади территории. Аналогично рассчитывалась частота отсутствия возгораний в пределах определенной категории предикторных переменных. Таким образом были получены связи между каждой категорией предикторов и распределением лесных пожаров по территории участка и определено влияние каждого предиктора на вероятность возникновения пожара.

Экспозиция склона, крутизна склона отражают местные условия, такие как количество солнечного света, крутизна склона – усиление динамики пожара и обычно считаются коррелирующими с пожарами. На рис. 3 показана карта опасности возникновения ЛП, сгенерированная на основе модели веса доказательств (WOE).

Точность моделей.

Метод ROC-AUC. Площадь под кривой рабочих характеристик приемника (ROC), известная как метод ROC-AUC, является широко используемым методом для оценки точности и производительности прогностических моделей, представляет собой график зависимости специфичности (т.е. ложноположительного результата по оси x) от чувствительности (т.е. истинно положительного результата по оси y). При моделировании лесных пожаров, в котором индексы восприимчивости подразделяются на два класса (т.е. «пожароопасные» и «непожароопасные»), чувствительность (соотношение (SE)) и специфичность (соотношение (SP)) относятся к доле правильно спрогнозированных пикселей пожара и доле правильно спрогнозированных пикселей, не связанных с пожаром соответственно:

$SE = TP / (TP + FN); SP = TN / (TN + FP)$, (8) где TN (истинно отрицательный результат) и TP (истинно положительный результат) – количество пикселей, которые правильно определены как места возникновения пожаров, а FP (ложноположительный результат) и FN (ложноотрицательный результат) – количество пикселей, присвоенных ошибочно.

Таблица 2

Веса факторов-слоев, полученные методом веса доказательств (WOE)

Table 2

Factor-layer weights obtained by the Weight of evidence (WOE) method

Предиктор	WOE
Экспозиция склона	0,005
$NDVI$	0,379
$NDWI$	0,197
$PSRI$	0,048
Расстояние от дорог	0,140
Расстояние от НП	0,036
Высота	0,038
Крутизна склона	0,155

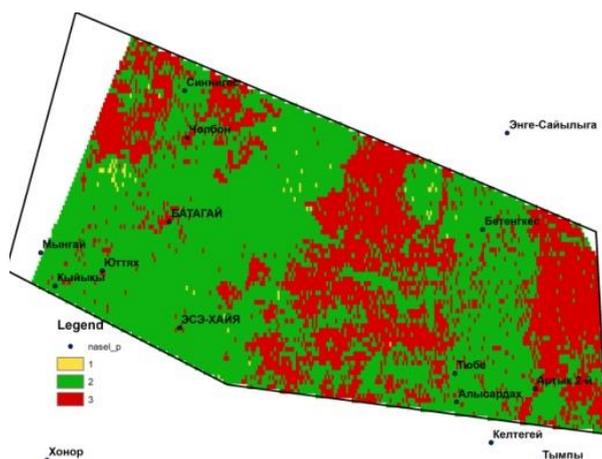


Рис. 3. Карта опасности возникновения ЛП, построенная с использованием метода веса доказательств (WOE)

Fig. 3. A fire hazard map of the site, constructed using the weight of evidence (WOE) method

Максимально возможная площадь под кривой (AUC) = 1 представляет 100 %-ю специфичность (все пиксели, не связанные с пожарами, правильно классифицированы) и 100 %-ю чувствительность (все пиксели, связанные с пожарами, правильно классифицированы). Кроме того, значения $AUC < 0,6$ указы-

вают на плохую, 0,6–0,7 – умеренную, 0,7–0,8 – хорошую, 0,8–0,9 – очень хорошую и $>0,9$ – отличную производительность модели [Hanley et al., 1982]. Точность карты опасности возникновения ЛП, полученная с использованием метода веса доказательств (WOE), равна 0,76 (рис. 4).

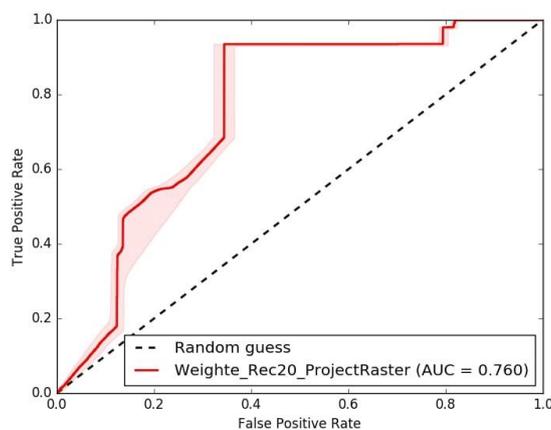


Рис. 4. Кривая ROC модели WOF, точность = 0,76

Fig. 4. The ROC curve of the WOF model, accuracy = 0.76

Заключение

Выполнены обработка и анализ наборов пространственных данных. Используя ГИС, данные ДЗЗ, фактические данные по лесным пожарам и статистические методы создана карта потенциальной пожароопасности для участка территории, объединяющая несколько тематических слоев. Модель байесовского

веса доказательств WOE, которая применялась в этом исследовании, использует фактические события лесных пожаров и предикторы, которые представляют различные природные и антропогенные аспекты. Результаты проверки подтвердили хорошую точность модели, которая имела значения 76 %. Этот подход позволил исследовать связи между каждой категорией предикторов и распределением лесных пожаров

по территории участка и определить влияние каждого фактора на вероятность возникновения пожара. Адекватный и оперативный анализ потенциальной опасности возникновения пожара, используя инструменты ДЦЗЗ и ГИС, позволяет своевременно принять эффективные превентивные меры по пожароопасной ситуации.

Список источников

- Белоусова Е.П., Латышева И.В., Латышев С.В., Лощенко К.А. и др.** Природные факторы возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области // Биосфера. 2016. № 4–8. С. 390–400.
- Кузнецов Г.В., Барановский Н.В.** Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск : СО РАН, 2009. 301 с.
- Курганович К.А., Макаров В.П.** Использование вегетационных индексов NDVI для оценки влияния пожаров на динамику растительности Цасучейского бора // Вестник ЗабГУ. 2015. Т. 117, № 2. С. 27–36.
- Латышева И.В., Вологжина С.Ж., Лощенко К.А.** Циркуляционные факторы возникновения лесных пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока летом 2019 и 2021 гг. // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2021. Т. 38. С. 54–70.
- Нестеров В.Г., Гриценко М.В., Шабунина Т.А.** Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса // Метеорология и гидрология. 1968. № 9. С. 102–104.
- Павличенко Е.А., Иванова В.В., Мисский С.И.** Использование геоинформационных систем при анализе и прогнозе природных чрезвычайных ситуаций на примере мониторинга лесных пожаров // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 4. С. 46–51.
- Протопопова В.В., Габышева Л.П.** Горимость лесов Верхоянского района (Северо-Восточная Якутия) // Успехи современного естествознания. 2017. № 5. С. 66–71.
- Пушкин А.А., Сидельник Н.Я., Ковалевский С.В.** Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах // Труды БГТУ. 2015. № 1. С. 36–40.
- Сидельник Н.Я., Пушкин А.А., Ковалевский С.В.** Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС // Труды БГТУ. 2018. Серия 1. № 1. С. 5–12.
- Стручкова Г.П., Крупнова Т.Г., Тихонова С.А., Капитонова Т.А., Ракова О.В.** Оценка опасности возникновения лесных пожаров с использованием спутниковой информации и ГИС // Вестник Воронежского государственного университета. География. Геоэкология. 2023. № 4. С. 34–44.
- Bonham-Carter G.F.** Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS. Oxford : Pergamon Press, 1994. 398 p.
- Bovio G., Quaglino A., Nosenzo A.** Individuazione di un indice di previsione per il pericolo // Monti e Boschi. 1984. V. 35, No. 4. P. 39–44.
- Chowdhury Ehsan H., Hassan Quazi K.** Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 104. P. 224–236.
- Dlamini M., Wisdom A.** A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland // Environmental Modelling & Software. 2010. V. 25, Iss. 2. P. 199–208. doi: 10.1016/j.envsoft.2009.08.002
- Hanley J.A., McNeil B.J.** The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve // Radiology. 1982. V. 143 (1). P. 29–36.
- Hernandez-Leal P.A., Arbelo M., Gonzalez-Calvo A.** Fire risk assessment using satellite data // Advances in Space Research. 2006. V. 37, Is. 4. P. 741–746.
- Hong Haoyuan, Jaafari Abolfazl, Zenner Eric K.** Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators // Ecological Indicators. 2019. V. 101. P. 878–891. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.01.056
- Huesca Margarita, Litago Javier, Merino-de-Miguel Silvia, Cicuendez-López-Ocaña Victor, Palacios-Orueta Alicia** Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 26. P. 363–376.
- Jaafari A., Najafi A., Rezaeian J., Sattarian A., Ghajar I.** Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran // Land Use Policy. 2015. V. 47. P. 198–208.
- Jaafari A., Zenner K. Eric, Thai Pham Binh** Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers // Ecological Informatics. 2018. V. 43. P. 200–211. doi: 10.1016/j.ecoinf.2017.12.006
- Ju Weiyi, Zhixiang Xing, Jie Wu, Qingchun Kang.** Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. V. 98. 104082.
- Mohajane Meriame, Romulus Costache, Firoozeh Karimi, Quoc Bao Pham, Ali Essahlaoui, Hoang Nguyen, Giovanni Laneve, Fatima Oudija.** Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area // Ecological Indicators. 2021. V. 129. 107869.
- Peinl P.** A retrospective on ASPires – An advanced system for the prevention and early detection of forest fires // Internet of Things. 2021. 100456.
- Peterson D., Hyer E., JunWang A** short-term predictor of satellite-observed fire activity in the North American boreal forest: Toward improving the prediction of smoke emissions // Atmospheric Environment. 2013. V. 71. P. 304–310.
- Rivière Miguel, Jonathan Lenglet, Adrien Noirault, François Pimont, Jean-Luc Dupuy.** Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis // Forest Ecology and Management. 2023. V. 539. 121014.
- Michael Yaron, Helman David, Glickman Oren, Gabay David, Brenner Steve, Lensky Itamar M.** Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series // Science of The Total Environment. 2021. V. 764. 142844.
- Zechuan Wu, Bin Wang, Mingze Li, Yuping Tian, Ying Quan, Jianyang Liu** Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence // Ecological Indicators. 2022. V. 136. 108653.

References

- Belousova E.P., Latysheva I.V., Latyshev S.V., Loshchenko K.A. et al. *Prirodnye faktory vozniknoveniya lesnyh pozharov na territorii Irkutskoj oblasti* [Natural factors of forest fires in the Irkutsk region] // Biosfera. 2016. No. 4–8. pp. 390–400. In Russian
- Kuznecov G.V., Baranovskij N.V. *Prognoz vozniknoveniya lesnyh pozharov i ih ekologicheskikh posledstvij*. [Forecast of forest fires and their environmental consequences] Novosibirsk : SO RAN. 2009, 301 p. In Russian
- Kurganovich K.A., Makarov V.P. *Ispol'zovanie vegetacionnyh indeksov NDVI dlya ocenki vliyaniya pozharov na dinamiku rastitel'nosti Casuchejskogo bora* [The use of NDVI vegetation indices to assess the impact of fires on the vegetation dynamics of the Tsasuchey forest] // Vestnik ZabGU. 2015. No. 2, V. 117. pp. 27–36. In Russian
- Latysheva I.V., Vologzhina S.ZH., Loshchenko K.A. *Cirkulyacionnye faktory vozniknoveniya lesnyh pozharov na territorii Sibiri i Dal'nego Vostoka letom 2019 i 2021 gg.* [Circulating factors of forest fires in Siberia and the Far East in the summer of 2019 and 2021] // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle» [The Bulletin of Irkutsk State University]. 2021, No. 4, V. 38. pp. 54–70. In Russian
- Nesterov V.G., Gricenko M.V., Shabunina T.A. *Ispol'zovanie temperatury točki rosy pri raschete pokazatelya gorimosti lesa* [Using the dew point temperature in calculating the forest burnability index] // Meteorologiya i gidrologiya [Meteorology and hydrology]. 1968, No. 9, pp. 102–104. In Russian
- Pavlichenko E.A., Ivanov V.V., Mis'kiv S.I. *Ispol'zovanie geoinformacionnyh sistem pri analize i prognoze prirodnyh chrezvychajnyh situacij na primere monitoringa lesnyh pozharov* [The use of geoinformation systems in the analysis and forecasting of natural emergencies on the example of forest fire monitoring] // Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti [Civil Security Technologies]. 2004. No. 4. pp. 46–51. In Russian
- Protopopova V.V., Gabysheva L.P. *Gorimost' lesov Verhoyanskogo rajona (Severo-Vostochnaya Yakutiya)* [The mountainous nature of the forests of the Verkhoyansky district (North-Eastern Yakutia)] // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya [Advances in current natural sciences]. 2017. No. 5. pp. 66–71. In Russian
- Pushkin A.A., Sidel'nik N.YA., Kovalevskij S.V. *Ispol'zovanie materialov kosmicheskoy s'emki dlya ocenki pozharnoj opasnosti v lesah* [The use of satellite imagery materials to assess fire danger in forests] // Trudy BGTU. 2015. No. 1. pp. 36–40. In Russian
- Sidel'nik N.YA., Pushkin A.A., Kovalevskij S.V. *Kartirovanie povrezhdennyh lesnyh nasazhdenij i ob'ektov leshozoyajstvennyh meropriyatij s ispol'zovaniem materialov kosmicheskoy s'emki i GIS-tehnologii* [Mapping of damaged forest stands and objects of forestry activities using space survey materials and GIS technologies] // Trudy BGTU. Seriya 1. 2018. No. 1. pp. 5–12. In Russian
- Struchkova G.P., Krupnova T.G., Tihonova S.A., Kapitonova T.A., Rakova O.V. *Ocenka opasnosti vozniknoveniya lesnyh pozharov s ispol'zovaniem sputnikovoj informacii i GIS* [Assessment of the risk of forest fires using satellite information and GIS] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geoekologiya [Bulletin of Voronezh State University. Geography. Geocology]. 2023. No. 4. pp. 34–44. In Russian
- Bonham-Carter G.F. *Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS*. Oxford : «Pergamon Press», 1994. 398 p.
- Bovio G., Quaglino A., Nosenzo A. *Individuazione di un indice di previsione per il pericolo* // Monti e Boschi. 1984. V. 35, No. 4. pp. 39–44.
- Chowdhury Ehsan H., Hassan Quazi K. *Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems* // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2015. V. 104. pp. 224–236.
- M. Dlamini, Wisdom. *A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland* / Dlamini, M. Wisdom. // Environmental Modelling & Software. 2010. V. 25, Iss. 2. pp. 199–208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.08.002>.
- Hanley J.A., McNeil B.J. *The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve* // Radiology. 1982. V. 143 (1). pp. 29–36.
- Hernandez-Leal P.A., Arbelo M., Gonzalez-Calvo A. *Fire risk assessment using satellite data* // Advances in Space Research. 2006. V. 37, Iss. 4. pp. 741–746.
- Hong H., Jaafari A., Zenner E.K. *Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators* // Ecological Indicators. 2019. V. 101. pp. 878–891. doi: 10.1016/j.ecolind.2019.01.056
- Huesca M., Litago Ja., Merino-de-Miguel S., Cicuendez-López-Ocaña V., Palacios-Orueta A. *Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models* // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2014. V. 26. pp. 363–376.
- Jaafari A., Najafi A., Rezaeian J., Sattarian A., Ghajar I. *Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran* // Land Use Policy. 2015. V. 47. pp. 198–208.
- Jaafari A., Zenner K. Eric, Thai Pham Binh *Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers* // Ecological Informatics. 2018. V. 43. P. 200–211. doi: 10.1016/j.ecoinf.2017.12.006
- Ju Weiyi, Zhixiang Xing, Jie Wu, Qingchun Kang *Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China* // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2023. V. 98. 104082.
- Mohajane M., Romulus Costache, Firoozeh Karimi, Quoc Bao Pham, Ali Essahlaoui, Hoang Nguyen, Giovanni Laneve, Fatiha Oudija. *Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area* // Ecological Indicators. 2021. V. 129. 107869.
- Peinl P. *A retrospective on ASPires – An advanced system for the prevention and early detection of forest fires* // Internet of Things. 2021. 100456.
- Peterson D., Hyer E., Jun Wang. *A short-term predictor of satellite-observed fire activity in the North American boreal forest: Toward improving the prediction of smoke emissions* // Atmospheric Environment. 2013. V. 71. pp. 304–310.
- Rivière M., Lenglet J., Noirault A., Pimont F., Dupuy J.-L. *Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis* // Forest Ecology and Management. 2023. V. 539. 121014.
- Michael Ya., Helman D., Glickman O., Gabay D., Brenner S., Lensky I.M. *Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series* // Science of The Total Environment. 2021. V. 764. 142844.
- Zechuan Wu, Bin Wang, Mingze Li, Yuping Tian, Ying Quan, Jianyang Liu *Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence* // Ecological Indicators. 2022. V. 136. 108653.

Информация об авторах:

Стручкова Г.П., кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, отдел геоинформатики, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: pandoramy8@list.ru

Капитонова Т.А., кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, отдел геоинформатики, ФИЦ ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Крупнова Т.Г., кандидат химических наук, доцент, кафедра экологии и химической технологии, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

E-mail: krupnovatg@susu.ru

Тихонова С.А., ведущий инженер, отдел геоинформатики, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: sardankobeleva@gmail.com

Тарская Л.Е., ведущий инженер, отдел геоинформатики, ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, Якутск, Россия.

E-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Ракова О.В., кандидат химических наук, доцент, кафедра экологии и химической технологии ЮУрГУ, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.

E-mail: rakovaov@susu.ru

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов между авторами отсутствует.

Information about authors:

Struchkova G.P., Cand. Sci. (Technique), Leading Researcher, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: pandoramy8@list.ru

Kapitonova T.A., Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of Physical-Technical problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Krupnova T.G., Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Ecology and Chemical Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: krupnovatg@susu.ru

Tikhonova S.A., Leading engineer, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: sardankobeleva@gmail.com

Tarskaya L.E., Leading engineer, Department of Geoinformatics, V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North, SB RAS, Yakutsk, Russia.

E-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Rakova O.V., Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Ecology and Chemical Technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.

E-mail: rakovaov@susu.ru

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 28.03.2024; одобрена после рецензирования 09.12.2024; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 28.03.2024; approved after reviewing 09.12.2024; accepted for publication 02.06.2025