ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

www.journal.spb-niilh.ru
ISSN 2079-6080

DOI 10.21178/2079-6080.2024.3.98
УДК 630.43; 004.4+528.8

Оценка потенциальной опасности лесных пожаров с использованием методов многокритериального анализа решений, ГИС и спутниковых снимков

© Т.А. Капитонова[1], Г.П. Стручкова[1], Т.Г. Крупнова[2], С.А. Тихонова[1], Л.Е. Тарская[1], О.В. Ракова[2]

Assessment of the potential danger of forest fires using methods of multi-criteria analysis of solutions, GIS and satellite images

T.A. Kapitonova, G.P. Struchkova, T.G. Krupnova, S.A. Tikhonova, L.E. Tarskaya, O.V. Rakova (FSC Yakutsk Scientific Center SB RAS, V.P. Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS; Yuzhno-Ural State University)

One of the major natural disasters that cause huge damage to natural resources, threaten the safety of human life and important industrial and economic facilities are forest fires. To prevent and extinguish fires, it is critical to be able to identify where critical conditions for fire danger exist and where important facilities that are most at risk for environmental, physical or socio-economic reasons are located. The purpose of this study is to assess the risk of forest fires in the Verkhoyanskiy ulus area using multi-criteria decision analysis methods based on GIS and remotely sensed Earth observation data. Based on historical data on forest fires in the territory of Yakutia for 2017–2021, space images from Landsat satellites for May, June, July, August 2017–2021, ASTER GDEM 2013 after performing radiometric and atmospheric correction, values of spectral indices and terrain parameters were calculated. As a result of the analysis of historical data on forest fires, a study site was selected to study the dynamics of the state of plant communities. Geospatial datasets were processed and analyzed and potential fire hazard maps were created for the site, combining several thematic layers were constructed using statistical methods (frequency ratio (FR), analytic hierarchy process (AHP) models), and methods were compared. Timely, adequate assessment of forest fire danger and mapping of potential fire hazard zones are important and necessary to determine the scope of preventive fire prevention measures and effective fire extinguishing actions.

Key words: space imagery, forest fires, Landsat, ASTER GDEM, calculated spectral indices, slopes, altitudes, insolation, mapping, multicriteria decision analysis methods

Оценка потенциальной опасности лесных пожаров с использованием методов многокритериального анализа решений, ГИС и спутниковых снимков

Т.А. Капитонова, Г.П. Стручкова, Т.Г. Крупнова, С.А. Тихонова, Л.Е. Тарская, О.В. Ракова

Одним из основных стихийных бедствий, которые приводят к огромным ущербам для природных ресурсов, угрожают безопасности людей и важных объектов промышленности и хозяйствования, являются лесные пожары.

Для предотвращения и тушения пожаров крайне 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 данного исследования является оценка риска лесных пожаров на участке Верхоянского улуса в Республике Саха (Якутия) с использованием методов многокритериального анализа решений на основе ГИС и ДДЗЗ. На основе исторических данных по лесным пожарам на территории Якутии за 2017–2021 годы, космических снимков со спутников Landsat за май–август в эти же годы, ASTER GDEM 2013 года, после выполнения радиометрической и атмосферной коррекции, вычислены значения спектральных индексов и параметров рельефа. В результате анализа исторических данных по лесным пожарам для изучения динамики состояния растительных сообществ был выбран участок исследования. Выполнена обработка и анализ наборов геопространственных данных и создана карта потенциальной пожароопасности для участка, объединяющая несколько тематических слоев, с использованием статистических методов (модели частотного соотношения (FR), метода анализа иерархий (AHP)), проведено сравнение методов. Своевременная, адекватная оценка опасности лесного пожара и картирование зон потенциальной пожароопасности важны и необходимы для определения объема превентивных противопожарных мероприятий и эффективных действий по тушению пожаров.

Ключевые слова: космическая съемка, лесные пожары, Landsat, ASTER GDEM, расчетные спектральные индексы, уклоны, высоты, инсоляция, картирование, методы многокритериального анализа решений

Капитонова Тамара Афанасьевна – зав. отделом геоинформатики, канд. физико-математических наук
E-mail: kapitonova@iptpn.ysn.ru

Стручкова Галина Прокопьевна – ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук
E-mail: pandoramy8@list.ru

Крупнова Татьяна Георгиевна – доцент кафедры экология и химическая технология, канд. хим. наук
E-mail: krupnovatg@susu.ru

Тихонова Сардана Алексеевна – ведущий инженер
E-mail: sardankobeleva@gmail.com

Тарская Лина Егоровна – ведущий инженер
E-mail: lina.tarskaya@mail.ru

Ракова Ольга Викторовна – доцент кафедры экология и химическая технология, к.х.н.
E-mail: rakovaov@susu.ru

[1]ФИЦ Якутский научный центр СО РАН, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН,
677980, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1
Телефон: +7 (411) 239-06-00

[2]Южно-Уральский государственный университет
454080, г. Челябинск, проспект им. В.И. Ленина, д. 76
Телефон: +7 (351) 267-99-00

Введение

В последние годы для моделирования вероятности возникновения пожаров был разработан ряд методов, в которых используются преимущества дистанционного зондирования (ДЗЗ) и географических информационных систем (ГИС) [3, 6, 8, 10, 11, 14, 17, 19, 23–25, 27, 28].

Эти методы обычно предполагают, что условия, которые привели к возникновению пожаров в недавнем и более отдаленном прошлом, вероятно, продолжат 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 [11, 15, 18, 21, 22, 26], в том числе постепенно начали применяться методы мультикритериального анализа принятия решений (MCDA) для оценки риска возникновения пожаров.

В предыдущих работах мы использовали программное обеспечение ГИС и ДДЗЗ для изучения лесных пожаров в Верхоянском и Чурапчинском улусах Якутии с учетом 6 предикторов: состояние растительного покрова (индекс NDVI), увлажненность (водный индекс NDWI) и наличие старой отмирающей растительности (индекс содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы PSRI), влияние рельефа через тематические слои высот, уклонов и инсоляции. На этой основе была составлена локальная карта риска лесных пожаров методом ГИС-анализа, алгеброй карт [11].

В данной работе подход заключается в том, чтобы связать события возникновения пожаров с набором предикторных переменных, которые характеризуют особенности окружающей среды в пределах исследуемой территории, такие как топография и состояние растительности с учетом влияния деятельности человека.

Особенность климата и природные условия Якутии предопределяют чрезвычайно высокую горимость лесов, которая почти в 2 раза выше средней горимости лесного фонда России. По данным Департамента лесного хозяйства Республики Саха (Якутия), площадь не восстановившихся после пожаров гарей составляет 15 млн га при площади лесной растительности около 131 млн га. В регионах распространения многолетнемерзлых грунтов, в условиях слабого разложения растительного опада накопление горючего материала происходит в размерах, достаточных для возникновения лесных пожаров в засушливые периоды года. Известно, что тип напочвенных горючих материалов характеризует пирологическую особенность напочвенного покрова лесных участков, обусловливающую относительную скорость его пожарного созревания, а увеличение или уменьшение горимости в большей степени зависит от суммы осадков и температуры воздуха. Поэтому в условиях Якутии, особенно в малонаселенных и труднодоступных районах, предотвратить возникновение и распространение лесных пожаров на значительные площади практически невозможно. На восстановление растительного покрова после пожара необходимо 50 лет, а уровень многолетней мерзлоты стабилизируется еще медленнее [7].

Из анализа исторических данных за более чем полувековой период следует, что наиболее распространенными причинами возникновения пожаров являются «сухие грозы» в июле–августе (более 60 %) и антропогенный фактор (около 40 %), в основном от сельскохозяйственных палов.

Исследователями разных стран разработаны различные методы, формулы и показатели, в которых пожарная опасность оценивается, используя метеорологические данные, определяющие готовность к пожару лесных горючих материалов через потерю влажности. В России широко используется комплексный показатель пожарной опасности В.Г. Нестерова, предложенный в 1940-е годы [5], и его модификации, учитывающие параметры атмосферы, объем выпавших осадков и скорость ветра. В зарубежных странах применяется модифицированный показатель В.Г. Нестерова с учетом суточных поправок на осадки и скорость ветра – индекс PORT, а также такие индексы пожароопасности, как FFDM – в Австралии, ICONA –

в Испании, IMPI – в Италии, полученные по модели Мак Артура и учитывающие температуру, влажность воздуха, скорость ветра и уклон местности [13], индексы, которые отражают ежедневное изменение влагосодержания почв и лесного материала – канадский FWI [27], финский FMI [14].

Тенденция потепления климата может повысить угрозу засух и разрушительных природных пожаров в Сибири [2], что, учитывая сложный характер взаимодействия между факторами погоды, климата, рельефа, растительности и лесными пожарами обусловливает актуальность исследований возникновения лесных пожаров [1]. Согласно статистическим данным Федеральной службы государственной статистики субъектов Дальневосточного федерального округа, крупные лесные массивы Республики Саха (Якутия) составляют 2,5 % мировых и около 11 % запасов лесных ресурсов России. Общая территория, занятая лесом в Якутии, равна 51 %, при этом доля хвойных лесов составляет 84,4 % [4].

Объекты и методы исследования

В выполненном нами исследовании были использованы данные метеорологических спутников NOAA (США), полученные на приемной станции СКАНОР в Институте космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН (https://ikfia.ysn.ru/new/phoroom/files/lgi/files/hotspots_overview_map.html). Произведена обработка и систематизация данных мониторинга, разработка и заполнение базы данных лесных пожаров на территории Республики Саха (Якутия) за 2017–2021 годы, выполнен анализ исторических данных по пожарам за указанный период и выбор районов исследования. На основании анализа распределения очагов природных пожаров для более детального исследования был выбран Верхоянский улус, с максимальным количеством пожаров.

Выбор участка исследования в Верхоянском улусе сделан на основании анализа распределения очагов природных пожаров за 2017–2021 годы. В этом регионе наблюдалось максимальное количеством 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.

Верхоянский район расположен на севере Якутии, относится к Яно-Колымской лесопожарной области, Верхоянско-Черскому северотаежному округу, с резко континентальным климатом, горным рельефом, с низкой плотностью населения (0,1 чел./км^2). Средние зимние температуры: –38...–48 °С, летние – 15...17 °С. Количество осадков в год составляет от 150 до 300 мм. Леса занимают 25 % площади, заболоченность составляет 40 %. [7].

Данные дистанционного зондирования. Исходными материалами для обнаружения лесных пожаров и оценки пожароопасной ситуации послужили данные дистанционного зондирования, полученные из следующих открытых источников: Landsat8-OLI с сайта «earthexplorer.usgs.gov», снимки ASTER GDEM – «https://gdemdl.aster.jspacesystems.or.jp/index_en.html».

На основании данных космического мониторинга исследованы особенности крупных природных пожаров, произошедших на территории Якутии в период с 2017 по 2021 год. Использовались спутниковые изображения Landsat8-OLI за летние месяцы июнь, июль, август в течение указанного периода, снимки ASTER GDEM 2013 г. – для создания рельефа.

Последующая обработка материалов в ГИС позволяет провести пространственный анализ обнаруженных на территории Якутии пожаров и создать базу данных. Анализ результатов предыдущих исследований опасности ЛП показал важность учета антропогенного фактора. Вероятность возникновения очага возгорания под воздействием этого фактора во многом обусловливается расстоянием от дорог и населенных пунктов.

На основе предыдущих исследований, обзора литературы, характеристик мест возникновения пожаров и доступных данных в качестве объясняющих переменных для моделирования подверженности лесным пожа-

рам в этом исследовании были выбраны следующие 8 факторов: тематические изображения 3-х вегетационных индексов (NDVI, NDWI и PSRI), степень уклона местности, аспект, высота над уровнем моря, а также расстояние от дорог и от населенных пунктов (рис. 1).

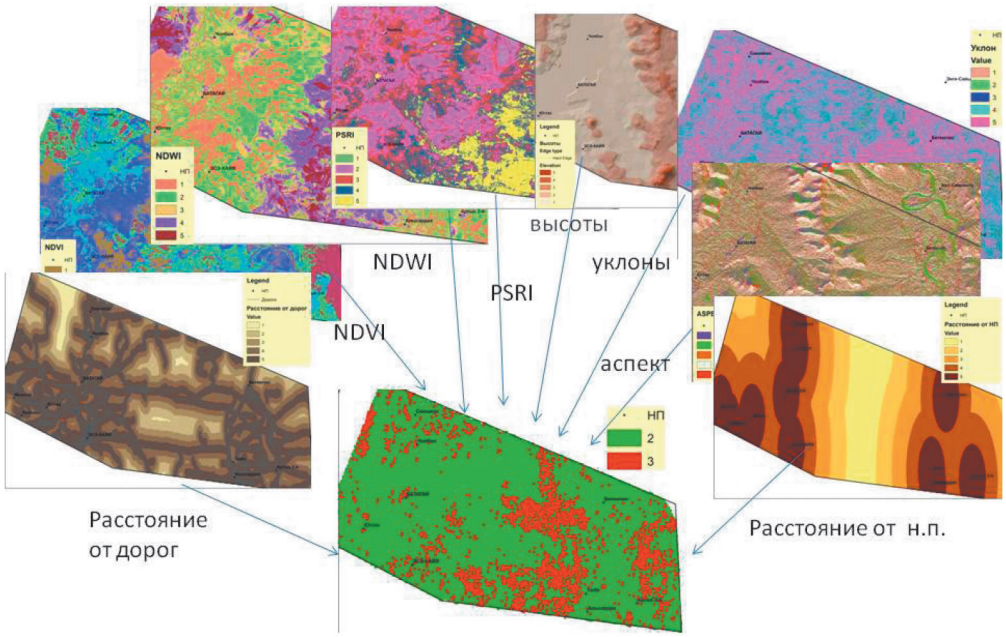


Рис. 1. Факторы, обусловливающие возникновения ЛП в исследуемом районе

NDVI (Нормализованный разностный вегетационный индекс) Универсальный индикатор состояния растительности, может принимать значения от –1 до 1. Для растительности NDVI принимает положительные значения, обычно от 0,2 до 0,8. Далее растр был переклассифицирован на пять классов по степени риска возгорания.

NDWI (Нормализованный разностный водный индекс). Данный показатель является относительным и определяет количество влагозапаса в растительном покрове, которое взаимодействует с поступающим солнечным излучением. Алгоритм позволяет выявить качественный признак увлажненности растительности. Показатель NDWI чувствителен к изменениям влажности. Значения этого индекса колеблются в интервале от –1 до 1. Обычный диапазон для зеленой растительности составляет от –0,1 до 0,4. Считается, что для водных объектов значения индекса меняются от 0,2 до 1, для объектов, не содержащих влагу – меньше 0. Затем растр был переклассифицирован на пять классов по степени риска возгорания.

PSRI индекс содержания углерода в виде лигнина и целлюлозы, разработан для учета сухостоя, мертвых или сухих растительных тканей. Увеличение значений этого показателя может отражать процесс «старения» и отмирания растений. Эти индексы широко используются при оценке пожароопасности на территории. Индекс принимает значения от –1 до 1. Для зеленой растительности его значения меняются от –0,1 до 0,2. Затем растр был переклассифицирован на пять классов по степени риска возникновения лесного пожара.

Высота. Карта высот была подготовлена путем преобразования цифровой модели рельефа (ЦМР) в треугольную нерегулярную сеть (TIN), а затем в растровые слои с помощью инструмента *TIN to Raster ArcGIS* ArcGIS. Растровые слои рельефа были переклассифицированы на пять подгрупп, используя классификацию в ArcGIS. Затем растр был пере-

классифицирован на пять классов по степени риска пожара.

Растровые слои уклонов. Растровые слои склонов были определены с помощью ЦМР инструментом генерации склонов в ArcGIS. Затем карта склонов была переклассифицирована на пять подгрупп, используя классификацию в ArcGIS, после этого растр был переклассифицирован на пять классов по степени риска возгорания.

Аспект. На опасность возникновения лесных пожаров, кроме климатических и погодных условий, влияет интенсивность поступающей солнечной радиации. Восточные, южные и западные склоны получают больше солнечного света и тепла, чем северные, и пожароопасные условия образуются на этих участках быстрее, кроме того, также может быть выше скорость распространения пожара. 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. наибольшему расстоянию от дороги) присвоена оценка 1, тогда как низшей категории (т. е. ближайшему расстоянию от дороги) присвоена оценка 5, что указывает на очень высокий и очень низкий риск ЛП соответственно.

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

Значения классов после переклассификации растровых слоев в порядке усиления степени риска пожаров приведены в таблице 1.

При формировании карты учитывались следующие переменные: состояние растительного покрова, увлажненность, наличие отмирающей растительности (сухостоя), влияние рельефа через тематические слои высот, уклонов и инсоляции, близость от дорог и населенных пунктов. Определение классов лесной пожарной опасности выполняется на основе комбинации полученных значений спектральных вегетационных индексов, с использованием инструментов Spatial Analyst Overlay analysis, Взвешенное наложение. Веса растров были определены двумя статистическими методами многокритериального анализа решений – частотного соотношения (FR), методом анализа иерархий2 (AHP).

Многокритериальный анализ решений – это метод анализа решений, основанный на нескольких критериях оценки. Для анализа оценок и весов между различными критериями используются математические и информационные инструменты. Как правило, для задач управления катастрофической ситуацией природного или техногенного характера не существует уникального оптимального решения и необходимо использовать предпочтения лица, принимающего решения.

MCDA особенно хорошо подходит для решения управления природными ресурсами, их интеграция в географические информационные системы (ГИС) позволяет комбинировать пространственные данные, статистические модели, оценочные суждения для создания визуальной информации, поддерживающей принятие решений. Обучающий набор точек был представлен 70 % от общего количества ЛП, 30 % ЛП использовались для валидации.

Частотное соотношение (FR). В целом для прогнозирования ЛП обычно предполагается, что возникновение пожара определяется комплексом факторов, и что будущие пожары будут происходить при тех же условиях, что и прошлые. Для количественного построения карты подверженности ЛП была применена модель частотного соотношения с использованием архивных данных мониторинга лесных пожаров за 2017–2021 годы и ГИС. Коэффициент частотности – это отношение площади, на которой произошли ЛП, к общей площади исследования, а также отношение вероятностей возникновения ЛП к их ненаступлению для данного признака

Таблица 1

Значения классов пожароопасности после переклассификации растровых слоев в порядке усиления рисков

Класс пожарной опасности	NDVI	NDWI	PSRI	Расстояние от дорог, км	Расстояние от НП, км	Высота, м	Уклон, °	Аспект
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 (292,5–360,0)
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)

[12]. Сначала было рассчитано частотное соотношение для каждого диапазона или типа фактора; затем частотные соотношения были суммированы для расчета индекса предрасположенности к возгоранию.

Метод анализа иерархий (AHP). Для оценки риска возникновения пожаров использовался AHP пространственного многокритериального анализа решений (MCDA), основанный как на количественных данных, так и на экспертных суждениях [20]. Метод анализа иерархий, разработанный Саати [9], представляет собой метод решения проблем с несколькими критериями путем установления их приоритетов. Принцип этого метода заключается в том, что он сравнивает пары факторов принятия решений, которые расположены в наборе иерархий, для присвоения весов. В AHP множественные попарные сравнения важности предикторов основаны на стандартизированной шкале сравнения из девяти уровней. Для этой цели AHP устанавливает шкалу важности от 1 до 9 (1 – равная, 3 – умеренная, 5 – сильная, 7 – очень сильная, 9 – чрезвычайно сильная). При этом четные баллы обычно используются как дополнительные, промежуточные значения, если в этом есть небходимость. Эта шкала предоставляет пользователям возможность сравнивать различные единицы измерения в иерархии. AHP позволяет сравнивать важность одного критерия относительно другого с помощью матрицы попарного сравнения.

В среде ГИС AHP используется для вычисления весов, приписываемых слоям пространственных данных, представляющих критерии, и для создания синтетических карт [20]. Метод AHP имеет встроенную систему сдержек и противовесов, что гарантирует, логически непротиворечивые решения при присвоении веса относительной важности критериев. Именно по этой причине AHP сегодня является одним из самых востребованных методов в управленческой науке. Он основан на понятии собственных векторов. Коэффициент согласованности должен быть меньше 0,1, чтобы доказать, что веса и приоритеты соответствуют друг другу; в противном случае следует проверить значения предпочтений.

Параметры, необходимые для проведения тестов на согласованность: индекс соответствия (*CI*), индекс случайных значений (*RI*).

CI был рассчитан с использованием уравнения следующего вида:

$$CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1),$$

где λ_{max} – максимальное собственное значение матрицы.

Окончательным расчетом AHP был *CR*, представляющий собой отношение *CI* к случайному индексу (*RI*), выраженное в уравнении $CR = CI/RI$. Значение случайного индекса (*RI*) учитывалось из таблицы 2.

Таблица 2

Случайный индекс (*RI*) для вычисления коэффициента согласованности (*CR*)

Количество факторов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Случайный индекс	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Для матрицы 8 × 8 *RI* составил 1,41, а *CI* для факторов, обусловливающих пожары, был рассчитан из матрицы AHP с использованием уравнения, и, наконец, вычисленный коэффициент согласованности (*CR*) = 0,05, что было меньше стандартного значения 0,1.

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 древостоев, наличие сухостоя и влагосодержания растительности, высота рельефа, уклон, аспект, а также от атропогенных факторов, таких как наличие поблизости 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

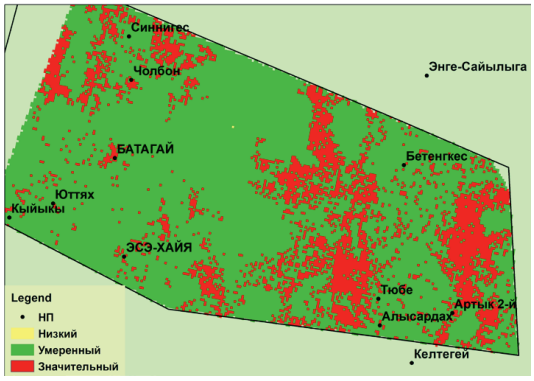
к менее точной оценке влияния независимой переменной на зависимую переменную, чем когда независимые переменные некоррелированы друг с другом. Критические значения *VIF* (коэффициент инфляции дисперсии) > 5 указывают на потенциальную проблему с мультиколлинеарностью. Для данной работы значения *VIF* находятся в интервале 1–1,15; предикторы «расстояние от дорог», «расстояние от населенных пунктов», «высота» – 1,15, остальные – 1. Общее эмпирическое правило для интерпретации *VIF* выглядит следующим образом: Значение 1 указывает на отсутствие корреляции между данной переменной-предиктором и любыми другими переменными-предикторами в модели.

Значение от 1 до 5 указывает на умеренную корреляцию между данной переменной-предиктором и другими переменными-предикторами в модели, но часто она недостаточно серьезная, чтобы требовать внимания

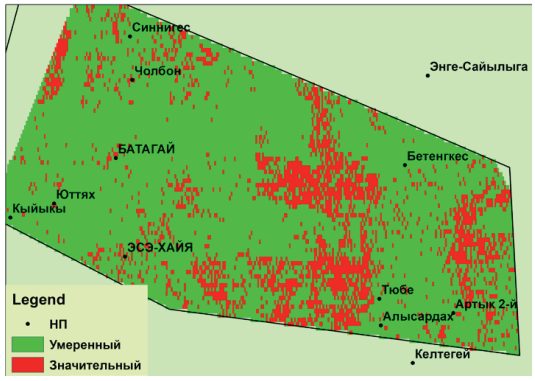
Значение больше 5 указывает на потенциально сильную корреляцию между данной переменной-предиктором и другими переменными-предикторами в модели. В этом случае оценки коэффициентов и *p*-значения в выходных данных регрессии, вероятно, ненадежны.

Результаты и их обсуждение

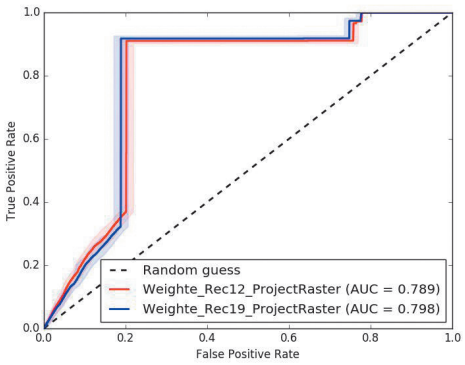
Анализ полученных результатов показал, какие предикторы и какие категории внутри каждой предикторной переменной были тесно связаны с возникновением пожаров в ландшафте. Конечными продуктами трех моделей лесных пожаров были три карты распределения, которые представляют различные уровни подверженности возникновению пожаров в исследуемом ландшафте (рис. 2). На рисунке 2а показана карта опасности возникновения ЛП, сгенерированная на основе модели соотношения частот.



а)



б)



в)

Рис. 2. Карты пожароопасности территории, построенные с использованием: частотного соотношения (FR); б) метода анализа иерархий (AHP); в) точности моделей FR = 0,798; AHP = 0,789

Частотное соотношение (FR)

При использовании модели отношения частот была получена пространственная взаимосвязь между распределением очагов ЛП и каждым фактором, связанным с ЛП. В исследуемой области общее количество пикселей составило 136778, а количество пикселей, связанных с возникновением ЛП – 1928. Корреляция коэффициентов была рассчитана на основе анализа взаимосвязи между ЛП и соответствующими факторами. Рейтинг типа или диапазона каждого фактора был присвоен на основе соотношения между ЛП и типом или диапазоном каждого фактора, то есть отношением количества пикселей, на которых произошли пожары, к общему количеству пикселей.

Наиболее важным показателем с точки зрения веса получился предиктор «расстояние от дорог» (0,175); следующими по важности являются «индекс содержания влаги в растительности NDWI» и «высота» (0,131); слои «расстояние от населенных пунктов» и «индекс состояния растительности NDVI» имеют одинаковый уровень значимости 0,123. Слоям аспекта, PSRI и уклонов были присвоены соответственно следующие по важности значения весов: 0,114, 0,107 и 0,096. Наименьший вклад в опасность возгорания вносит фактор «уклон» – 0,096 (табл. 3).

Таблица 3

Веса факторов-слоев, полученные методом частотного соотношения и методом анализа иерархий

Предикторы	FR	AHP
Аспект	0,114	0,066
NDVI	0,123	0,208
NDWI	0,131	0,205
PSRI	0,107	0,134
Расстояние от дорог	0,175	0,152
Расстояние от НП	0,123	0,152
Высота	0,131	0,054
Уклон	0,096	0,03

Метод аналитической иерархии (AHP)

Наиболее важный показатель с точки зрения веса был определен как «состояние растительности NDVI» – 0,208 и «водный индекс NDWI» – 0,205, следующими важными предикторами были определены «расстояние от населенных пунктов» и «расстояние до дорог» – 0,152, поскольку анализ архивных событий мониторинга ЛП, показывает, что антропогенный фактор играет большую роль в возникновении ЛП на территории Якутии. Фактор «наличия сухостоя PSRI» был определен следующим по важности – 0,134. Слоям «аспекта», «высот» и «уклонов» были присвоены следующие по важности значения весов (0,066, 0,054 и 0,03). Наименьший вклад в опасность возгорания вносит фактор «уклон» – 0,03.

Затем были рассчитаны общие баллы с использованием простой взвешенной суммы. Соответственно, каждый пиксель выходной карты был рассчитан с использованием следующего суммирования каждого слоя, умноженного на свой вес. На рисунке 2б показана карта опасности возникновения ЛП, сгенерированная на основе метода анализа иерархий (AHP).

Вычисленные значения веса приведены в таблице 3. Были рассчитаны коэффициенты согласованности для всех парных сравнений, использованных для получения карты опасности ЛП, которые оказались согласованными (< 0,1).

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. Кривая ROC 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 ("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.

$$SE = TP/(TP + FN)$$
$$SP = TP/(TN + FP)$$

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.

Максимально возможная площадь под кривой (AUC) = 1 представляет 100 % специфичность (все пиксели, не связанные с пожарами, правильно классифицированы) и 100% чувствительность (все пиксели, связанные с пожарами, правильно классифицированы). Кроме того, значения AUC < 0,6 указывают на плохую, 0,6–0,7 – умеренную, 0,7–0,8 – хорошую, 0,8–0,9 – очень хорошую и > 0,9 – отличную производительность модели [16].

Точность карты опасностей составила: а) частотного соотношения (*FR*) – 0,798; б) анализа иерархий (AHP) – 0,789, (рис. 2в).

Выводы

В данной работе сделана попытка связать события возникновения пожаров, с набором предикторных переменных, которые характеризуют особенности окружающей среды в пределах исследуемой территории, такие как топография, состояние растительности и антропогенное влияние.

Выполнена обработка и анализ наборов геопространственных данных и созданы карты потенциальной пожароопасности для участка, объединяющая несколько тематических слоев построена используя с использованием статистических методов многокритериального анализа решений (модели частотного соотношения (FR), метода анализа иерархий (AHP)), произведено сравнение точности карт, полученных данными методами. Своевременная, адекватная оценка опасности лесного пожара и картирование зон потенциальной пожароопасности важны и необходимы для определения объема превентивных противопожарных мероприятий и эффективных действий по тушению пожаров.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Рег. № 1023030900073–8–2.3.3, научная тема FWRS –2024–0032) и Российского научного фонда № 24–27–20095.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусова, Е.П. Природные факторы возникновения лесных пожаров на территории Иркутской области / Е.П. Белоусова, И.В. Латышева, С.В. Латышев, К.А. Лощенко и др. // Биосфера. – 2016. – № 4-8. – С. 390–400.
2. Кузнецов, Г.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий / Г.В. Кузнецов, Н.В. Барановский. – Новосибирск : СО РАН, 2009. – 301 с.
3. Курганович, К.А. Использование вегетационных индексов NDVI для оценки влияния пожаров на динамику растительности Цасучейского бора / К.А. Курганович, В.П. Макаров // Вестник ЗабГУ. – 2025. – Т. 117, № 2. – С. 27–36.
4. Латышева, И.В. Циркуляционные факторы возникновения лесных пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока летом 2019 и 2021 гг. / И.В. Латышева, С.Ж. Вологжина, К.А. Лощенко // Известия

Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2021. – Т. 38. – С. 54–70.
5. Нестеров, В.Г. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса / В.Г. Нестеров, М.В. Гриценко, Т.А. Шабунина // Метеорология и гидрология. – 1968. – № 9. – С. 102–104.
6. Павличенко, Е.А. Использование геоинформационных систем при анализе и прогнозе природных чрезвычайных ситуаций на примере мониторинга лесных пожаров / Е.А. Павличенко, В.В. Иванов, С.И. Миськив // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 4. – С. 46–51.
7. Протопопова, В.В. Горимость лесов Верхоянского района (Северо-Восточная Якутия) / В.В. Протопопова, Л.П. Габышева // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 5. – С. 66–71.
8. Пушкин, А.А. Использование материалов космической съемки для оценки пожарной опасности в лесах / А.А. Пушкин, Н.Я. Сидельник, С.В. Ковалевский // Труды БГТУ. – 2015. – № 1 – С. 36–40.
9. Саати, Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети / Томас Л. Саати. – Пер. с англ. / Науч. ред. А.В. Андрейчиков, О.Н. Андрейчикова. – М. : Издательство ЛКИ. – 2008. – 360 с.
10. Сидельник, Н.Я. Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС-технологий / Н.Я. Сидельник, А.А. Пушкин, С.В. Ковалевский // Труды БГТУ. – 2018. – Серия 1, № 1. – С. 5–12.
11. Стручкова, Г.П. Оценка опасности возникновения лесных пожаров с использованием спутниковой информации и ГИС / Г.П. Стручкова, Т.Г. Крупнова, С.А. Тихонова, Т.А. Капитонова, О.В. Ракова // Вестник Воронежского государственного университета. География. Геоэкология. – 2023. – № 4. – С. 34–44.
12. Bonham-Carter, G.F. Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS // G.F. Bonham-Carter. – Oxford : Pergamon Press, 1994. – 398 p.
13. Bovio, G. Individuazione di un indice di previsione per il pericolo / G. Bovio, A. Quaglino, A. Nosenzo // Monti e Boschi. – 1984. – Vol. 35, № 4. – P. 39–44.
14. Chowdhury, Ehsan H. Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems / Ehsan H. Chowdhury, Quazi K. Hassan // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Vol. 104. – June. – P. 224–236.
15. Dlamini, Wisdom M. A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland / Wisdom M. Dlamini // Environmental Modelling & Software. 2010. – Vol. 25. – Issue 2. – Feb. – P. 199–208. – DOI https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.08.002.
16. Hanley, J.A. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve / J.A. Hanley, B.J. McNeil // Radiology. – 1982. – Vol. 143 (1). – P. 29–36.
17. Hernandez-Leal, P.A. Fire risk assessment using satellite data / P.A. Hernandez-Leal, M. Arbelo, A. Gonzalez-Calvo // Advances in Space Research. – 2006. – Vol. 37. – Issue 4. – P. 741–746.
18. Hong, Haoyuan. Predicting spatial patterns of wildfire susceptibility in the Huichang County, China: An integrated model to analysis of landscape indicators / Haoyuan Hong, Abolfazl Jaafari, Eric K. Zenner // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 101. – June. – P. 878–891. – DOI https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.056.
19. Huesca, M. Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models / Margarita Huesca, Javier Litago, Silvia Merino-de-Miguel, Victor Cicuendez-López-Ocaña, Alicia Palacios-Orueta // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2014. – Vol. 26. – February. – P. 363–376.
20. Jaafari, A. Planning road networks in landslide-prone areas: a case study from the northern forests of Iran / A. Jaafari, A. Najafi, J. Rezaeian, A. Sattarian, I. Ghajar // Land Use Policy. – 2015. – Vol. 47. – P. 198–208.
21. Jaafari, A. Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers / Abolfazl Jaafari, Eric K. Zenner, Binh Thai Pham // Ecological Informatics. – 2018. – Vol. 43. – Jan. – P. 200–211. – DOI https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.12.006.
22. Ju, W. Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China / Weiyi Ju, Zhixiang Xing, Jie Wu, Qingchun Kang // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2023. – Vol. 98. – Nov. – P. 104082.
23. Mohajane, M. Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area / Meriame Mohajane, Romulus Costache, Firoozeh Karimi, Quoc Bao Pham, Ali Essahlaoui, Hoang Nguyen, Giovanni Laneve, Fatiha Oudija // Ecological Indicators. – 2021. – Vol. 129. – October. – P. 107869.

24. Peinl, P. A retrospective on ASPires – An advanced system for the prevention and early detection of forest fires / Peter Peinl // Internet of Things. – 2021. – 28 August. – P. 100456.
25. Peterson, D. A short-term predictor of satellite-observed fire activity in the North American boreal forest: Toward improving the prediction of smoke emissions / David Peterson, Edward Hyer, JunWang // Atmospheric Environment. – 2013. – Vol. 71. – June. – P. 304–310.
26. Rivière, M. Mapping territorial vulnerability to wildfires: A participative multi-criteria analysis / Miguel Rivière, Jonathan Lenglet, Adrien Noirault, François Pimont, Jean-Luc Dupuy // Forest Ecology and Management. – 2023. – Vol. 539. – 1 July. – P. 121014.
27. Yaron, M. Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series / Yaron Michael, David Helman, Oren Glickman, David Gabay, Steve Brenner, Itamar M. Lensky // Science of The Total Environment. – 2021. – Vol. 764. – 10 April. – P. 142844.
28. Wu, Z. Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence / Zechuan Wu, Bin Wang, Mingze Li, Yuping Tian, Ying Quan, Jianyang Liu // Ecological Indicators. – 2022. – Vol. 136. – March. – P. 108653.

REFERENCES

1. Belousova Ye.P., Latysheva I.V., Latyshev S.V., Loshchenko K.A., Shcheblykin A.S. Natural factors for the occurrence of forest fires on the territory of the Irkutsk region. *Biosfere [Biosfera]*, 2016, no. 4-8, pp. 390–400. (In Russian).
2. Kuznetsov G.V., Baranovskiy N.V. Forecast of forest fire occurrence and their ecological consequences. Novosibirsk, SB RAS, 2009, 301 p. (In Russian).
3. Kurganovich K.A., Makarov V.P. Using NDVI vegetation indices to assess the impact of fires on the vegetation dynamics of the Tsasucheysky pine forest. *Bulletin of ZabSU [Vestnik ZabGU]*, 2025, v. 117, no. 2, pp. 27–36. (In Russian).
4. Latysheva I.V., Vologzhina S.Zh., Loschenko I.V. Circulation factors of forest fires in Siberia and the Far East in the summer of 2019 and 2021, *Bulletin of Irkutsk State University. Earth Sciences Series [Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Nauki o Zemle»]*, 2021, v. 38, pp. 54–70. (In Russian).
5. Nesterov V.G., Gritsenko M.V., Shabunina T.A. The use of dew point temperature in the calculation of the forest fire index. *Meteorology and hydrology [Meteorologiya i gidrologiya]*, 1968, no. 9, pp. 102–104. (In Russian).
6. Pavlichenko E.A., Ivanov V.V., Miskiv S.I. Use of geoinformation systems in the analysis and forecasting of natural emergencies on the example of monitoring forest fires. *Civil security technologies [Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti],* 2004, no. 4, pp. 46–51. (In Russian).
7. Protopopova V.V., Gabysheva L.P. Burning forests of the Verkhoyansk region (North-Eastern Yakutia). *Achievements of modern natural science [Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya]*, 2017, no. 5, pp. 66–71. (In Russian).
8. Pushkin A.A., Sidel'nik N.Ya., Kovalevskiy S.V. The use of space imagery materials for assessing fire danger in forests. *Proceedings of the Bauman State Technical University [Trudy BGTU]*, 2015, no. 1, pp. 36–40. (In Russian).
9. Saati Thomas L. Decision Making with Dependencies and Feedbacks: Analytical Networks. Transl. from English, Moscow: LKI Publishing House, 2008, 360 p., transl. from English. (In Russian).
10. Sidel'nik N. Ya., Pushkin A.A., Kovalevskiy S.V. Mapping of damaged forest plantations and objects of forestry activities using satellite imagery and GIS technologies. *Proceedings of the Bauman State Technical University [Trudy BGTU]*, 2018, no. 1-1, pp. 5–12. (In Russian).
11. Struchkova G.P., Krupnova T.G., Tikhonova S.A., Kapitonova T.A., Rakova O.V. Forest Fire Hazard Assessment Using Satellite Information and GIS. *Bulletin of Voronezh State University. Geography. Geoecology [Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geoekologiya],* 2023, no. 4, pp. 34–44. (In Russian).
12. Bonham-Carter G.F. Geographic Information Systems for Geoscientists, Modeling with GIS. Oxford, Pergamon Press, 1994, 398 p.
13. Bovio G., Quaglino A., Nosenzo A. Individuazione di un indice di previsione per il pericolo. *Monti e Boschi*, 1984, vol. 35, no. 4, pp. 39–44.
14. 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, vol. 104, June, pp. 224–236.

15. Dlamini Wisdom M. A Bayesian belief network analysis of factors influencing wildfire occurrence in Swaziland. *Environmental Modelling & Software*, 2010, vol. 25, is. 2, Feb., pp. 199–208. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.08.002.
16. Hanley J.A., McNeil B.J. The meaning and use of the area under a receiver operating characteristic (ROC) curve. *Radiology*, 1982, vol. 143 (1), pp. 29–36.
17. Hernandez-Leal P.A., Arbelo M., Gonzalez-Calvo A. Fire risk assessment using satellite data. *Advances in Space Research*, 2006, vol. 37, is. 4, pp. 741–746.
18. 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, vol. 101, June, pp. 878–891. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.056.
19. Huesca M., Litago J., 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, vol. 26, February, pp. 363–376.
20. 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 / A. Jaafari. *Land Use Policy*, 2015, vol. 47, pp. 198–208.
21. Jaafari A., Zenner Eric K., Pham Binh Thai. Wildfire spatial pattern analysis in the Zagros Mountains, Iran: A comparative study of decision tree based classifiers. *Ecological Informatics*, 2018, vol. 43, Jan., pp. 200–211. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.12.006.
22. Ju W., Xing Zhixiang, Wu Jie, Kang Qingchun. Evaluation of forest fire risk based on multicriteria decision analysis techniques for Changzhou, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, vol. 98, Nov., p. 104082.
23. Mohajane M., Costache R., Karimi F., Pham Quoc Bao, Essahlaoui Ali, Nguyen Hoang, Laneve G., Oudija F. Application of remote sensing and machine learning algorithms for forest fire mapping in a Mediterranean area. *Ecological Indicators*, 2021, vol. 129, October, p. 107869.
24. Peinl P. A retrospective on ASPires – An advanced system for the prevention and early detection of forest fires. *Internet of Things*, 2021, 28 August, p. 100456.
25. Peterson D., Peterson D., Hyer E., Wang Jun. 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, vol. 71, June, pp. 304–310.
26. 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, vol. 539, 1 July, p. 121014.
27. Yaron M., 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, vol. 764, 10 April, p. 142844.
28. Wu Z., Wang Bin, Li Mingze, Tian Yuping, Quan Ying, Liu Jianyang. Simulation of forest fire spread based on artificial intelligence. *Ecological Indicators*, 2022, vol. 136, March, p. 108653.

Статья поступила в редакцию 20.03.2024