

Научная статья

УДК 630*431.5(470.51)

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-76-91

Динамика изменения лесопожарной опасности в Удмуртской Республике

А.П. Тюрин, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: J-6236-2014,*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3898-0804>

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, ул. Студенческая, д. 7, г. Ижевск, Россия, 426069; asd1978@mail.ru

Поступила в редакцию 11.09.23 / Одобрена после рецензирования 05.12.23 / Принята к печати 07.12.23

Аннотация. Исследованы основные подходы к организации мониторинга пожароопасных ситуаций на региональном уровне и проблемы, возникающие при техническом обеспечении такого мониторинга. Целью работы является изучение динамики изменения пожарной опасности в лесах на территории Удмуртской Республики. Варьирование комплексного показателя пожарной опасности, наблюдаемого независимо от структуры таксационных выделов, рассматривается наряду с данными о фактических пожарах 2011–2023 гг. В связи со значительной протяженностью территории Удмуртии предполагается различие комплексного показателя с изменением долготы или широты, рассчитанного для максимального количества точек наблюдения одновременно. Разработано приложение, с помощью которого реализованы сбор, отображение данных и расчет комплексного показателя пожарной опасности по 210 населенным пунктам в течение 94 дней летнего периода 2023 г. Приложение позволяет оценить как статические данные по пожарам в прошлом в виде «пузырьковой» визуализации, так и колебания комплексного показателя в течение пожароопасного сезона. В качестве погодного сервиса использовался OpenWeather, библиотека картографических данных – OpenLayers. Отличительными особенностями созданного приложения стали: а) отображение направления ветра и класса пожарной опасности в точках наблюдения с помощью цветowych маркеров; б) использование растровой карты-подложки региона для определения потенциальной связи сложившегося класса пожарной опасности с характером участков лесного фонда. Как показало исследование, в пределах каждого из 25 муниципальных образований региона фактический комплексный показатель может значительно меняться. Результаты многодневного мониторинга позволили установить сильную корреляционную связь (0,88) между показателем и долготой для населенных пунктов Удмуртской Республики, слабую (0,31) – между показателем и широтой. Показано, что большая часть пожаров за апрель–октябрь приходится на май – 33,8 % от общего числа случаев в 2011–2023 гг. Результаты исследования могут быть полезны для разработки и проведения мероприятий по предупреждению лесных пожаров и снижению ущерба от них, а также для уточнения или валидации зон потенциальных возгораний на основе современных подходов.

Ключевые слова: лесной пожар, динамика изменения, комплексный показатель пожарной опасности, сезон, отслеживание погодных данных, направление ветра

Для цитирования: Тюрин А.П. Динамика изменения лесопожарной опасности в Удмуртской Республике // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 76–91. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-76-91>

Original article

The Dynamics of Forest Fire Hazard Changes in the Udmurt Republic

Alexander P. Tyurin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [J-6236-2014](https://orcid.org/0000-0002-3898-0804),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3898-0804>

Kalashnikov Izhevsk State Technical University, ul. Stencheskaya, 7, Izhevsk, 426069, Russian Federation; asd1978@mail.ru

Received on September 11, 2023 / Approved after reviewing on December 5, 2023 / Accepted on December 7, 2023

Abstract. The main approaches to the organization of monitoring of fire hazardous situations at the regional level and the problems arising in the technical support of such monitoring have been investigated. The aim of this work has been to study the dynamics of changes in fire hazard in forests on the territory of the Udmurt Republic. The variation in the comprehensive fire hazard indicator, observed regardless of the structure of survey plots, has been considered along with data on actual fires in 2011–2023. Due to the significant extent of the territory of Udmurtia, it has been assumed that the comprehensive indicator differs with a change in longitude or latitude, calculated for the maximum number of observation points simultaneously. An application has been developed that collects and displays data and calculates a comprehensive fire hazard indicator for 210 localities over 94 days of the summer period of 2023. The application allows one to evaluate both static data on fires in the past in the form of a “bubble” visualization, and fluctuations in the comprehensive indicator during the fire season. OpenWeather has been used as a weather service, and OpenLayers – as a map data library. The distinctive features of the created application have been: a) displaying the wind direction and fire hazard class at observation points using color markers; b) using a raster map of the region to determine the potential connection between the current fire hazard class and the nature of the forest fund plots. As the study has shown, within each of the 25 municipalities of the region, the actual comprehensive indicator can vary significantly. The results of multi-day monitoring have made it possible to establish a strong correlation (0.88) between the indicator and longitude for populated areas of the Udmurt Republic, and a weak correlation (0.31) between the indicator and latitude. It has been shown that the majority of fires in April–October occur in May – 33.8 % of the total number of cases that have occurred during the period of 2011–2023. The results of the study can be useful for the development and implementation of measures to prevent forest fires and reduce damage from them, as well as for clarifying or validating potential fire zones based on modern approaches.

Keywords: forest fire, dynamics of change, comprehensive fire hazard indicator, season, weather data tracking, wind direction

For citation: Tyurin A.P. The Dynamics of Forest Fire Hazard Changes in the Udmurt Republic. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 76–91. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-76-91>

Введение

Лесные пожары играют решающую роль в трансформации ландшафта, смене растительности, деградации почв и качестве воздуха. Повышение точности оценки пожарного риска важно для предупреждения и снижения



негативных последствий пожара на лесную экосистему, т. к. в перспективе позволит планировать управляющее воздействие на появление возгораний принятыми способами. Для регионального уровня разработка методических подходов, обеспечивающих обоснование управленческих решений по предупреждению лесных пожаров является актуальной задачей, варианты решения которой раскрываются в различных научных источниках. Основные направления предсказания лесопожарных чрезвычайных ситуаций представлены Ю.В. Подрезовым [6]. Так, при оперативном наблюдении за пожарной опасностью в лесах используют данные спутникового мониторинга, обрабатываемые в геоинформационных системах. Известны, например, оперативная карта пожаров НИИ аэрокосмического мониторинга (http://aerocosmos.info/emergency_search/), картографирование пройденных огнем площадей, поддерживаемое Институтом космических исследований Земли (<http://iki-z.ru/default.aspx?id=3>), платформа для оперативного спутникового мониторинга пожаров «Сканэкс» (<http://pro.fires.ru>) и др. Полученные через информационные сервисы своевременные данные о воздействии огня на природные экосистемы способствуют эффективной охране лесов от пожаров, оценке экологических последствий. Аэрокосмический мониторинг результативен для планирования практической деятельности пожарных, поскольку позволяет ориентироваться на фактические случаи мест локализации огня.

С другой стороны, в настоящее время в соответствии с приказом Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 «Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды» (зарег. в Минюсте РФ 17.08.2011 № 21649) пожарная опасность в лесах классифицируется в зависимости от условий погоды. Данный подход дает возможность планировать предупреждающие мероприятия. В субъектах Российской Федерации могут разрабатываться региональные классы пожарной опасности в лесах по условиям погоды, определяющие методику расчета комплексного показателя пожарной опасности (КП), границы классов пожарной опасности, методику учета осадков. Исследования, посвященные разработке шкалы региональных классов пожарной опасности, подробно рассмотрены А.В. Волокитиной с коллегами [4]. Каждый регион обладает индивидуальными особенностями с точки зрения типов лесов и лесных участков, распределения содержащихся в них лесных горючих материалов и влаги, динамики изменения условий, способствующих формированию лесных пожаров. Изучение таких индивидуальных особенностей для каждого региона является важным этапом прогнозирования лесных пожаров. Комбинированный анализ указанных подходов, реализованный в рамках одной системы, содержит большой потенциал для науки и практики.

Цель работы – оценка особенностей динамики изменения пожарной опасности в лесах Удмуртской Республики. Подобные исследования для данной территории до этого времени не проводились, хотя в научной периодике можно встретить отдельные исследования лесопожарных рисков в регионах на основе накопленных данных о возгораниях: Н.Н. Брушлинский с коллегами [2], С.Н. Волков с коллегами [3], К.Ж. Раимбеков [7], С.С. Тимофеева с коллегами [9].

За рубежом региональные исследования также нередки, по большей части они посвящены построению моделей оценки пожароопасных зон на тер-

риториях на основе ключевых показателей, прописанных в рамках соответствующих методик, например, Канадской методики, подробно разобранной B.D. Lawson et al. [16]. В отдельных источниках применяется картирование вероятности лесных пожаров в лесном массиве с использованием метода искусственной нейронной сети – для бассейна Верхнего Сейхана в Турции в работе S. Onur et al. [23], северо-востока Португалии в работе Y. Safi et al. [22]. Лесные пожары обуславливаются многими факторами – не только географическими и метеорологическими причинами. Большую роль в возникновении лесных пожаров играют и техногенные факторы, зависящие от социально-экономических условий. В исследовании V. Sevinç [24] ставится задача составления карты зон пожароопасности с помощью набора данных, включающего 11 антропогенных факторов, природный фактор и температуру. В рамках работы [24] региональные лесные управления Турции были разделены на 4 кластера с отображением их на карте: зона экстремального риска, высокого, умеренного и низкого. Такой подход позволяет сравнить разные районы по степени пожарного риска внутри отдельной территориальной единицы.

Оценка корреляции лесных пожаров с различными географическими и погодными факторами с дальнейшим применением результатов при картировании вероятности лесных пожаров приводится в работе [23]. На основе корреляции Пирсона установлено, что особенности ландшафта (высота над уровнем моря), древесный покров и температура сильно коррелируют с возможностью возгораний в лесу. В подобном исследовании Li Xiaowei et al. [17] приведены результаты прогнозирования пожарной опасности для 4 регионов Китая во взаимосвязи с географическими координатами, временем суток с учетом значительного диапазона. Показано, например, что пространственное положение оказывает существенное влияние во всех изученных регионах.

В исследовании D. Alves et al. [11] уточняются результаты предсказания пожарной опасности на границе Португалии и Испании на основе как КП, так и статистических данных о количестве пожаров и площади выгоревших территорий в 2005–2013 гг. Межрегиональные различия частично объясняются различиями в местных погодных и растительных условиях.

В исследовании M.M. Maombi et al. [18] совместное использование полевых и спутниковых данных о погоде позволило определить ежедневную опасность лесных пожаров в типичном лесу умеренного пояса на северо-востоке Китая осенью. Результаты работы привели к предположению о необходимости увеличения количества метеостанций в пожароопасных регионах. Установлено, что северо-восточная часть страны с лесным покровом 41,6 % имеет наибольшую территорию, пострадавшую от распространения огня.

Кроме установления территориальных особенностей в области лесопожарных чрезвычайных ситуаций, подходом для прогнозирования лесных пожаров является накопление статистической информации и совершенствование способов ее обработки с учетом многочисленных факторов, определяющих лесопожарную обстановку. Статистическая информация о лесных пожарах существует как для регионального уровня России, так и для зарубежных стран, например, в годовых отчетах Европейской информационной системы о лесных пожарах, один из которых опубликован J. San-Miguel-Ayanz et al. [15]. Эти отчеты содержат информацию об эволюции лесных пожаров, нанесенном ими ущербе, пожарной обстановке. В [15] показано, что большинство весенних по-

жаров возникло из-за антропогенного воздействия, а также в результате переноса пожаров с земель других категорий. В летний период, хотя и наблюдались максимальные температуры, причиной основной части пожаров стали человеческий фактор и грозовая активность. Осенью возгорания обусловлены только антропогенным фактором. Такая информация свидетельствует о том, что метеорологические показатели не всегда определяют возможность возникновения пожара, существуют и другие причины – особенности гидрологической сети, дорожных путей, источники возгораний, посещаемость человеком, фенологическое состояние растительности и др.

Статистическая информация по пожарам должна отражаться в рамках единой системы поддержки принятия решений. Такие системы могут помочь оптимизировать распределение ограниченных ресурсов, оценивать пожарный риск с учетом социально-экономических и погодных факторов в рамках комплексного мониторинга с помощью информационных систем, описанных E. Chuviesco et al. [13]. Ограничением существующих систем является недостаточно проработанная методика установки связей как с классом пожарной опасности по КП, так и со структурой таксационных выделов.

Существующие региональные исследования пожарной опасности разнообразны и направлены на выявление особенностей цикла развития лесных пожаров, характерного для конкретной местности.

В рамках данного исследования, впервые проведенного для Удмуртской Республики, предполагается установить:

взаимосвязь между КП (метеорологическим показателем) и географическими координатами;

особенности колебаний КП в пределах муниципального образования;

характер распределения пожаров по территории за период (2011–2023 гг.), для которого есть доступная информация.

Полученные результаты могут лечь в основу более точного прогнозирования лесных пожаров, базирующегося на использовании современных подходов, и станут вкладом в оценку пожарной опасности по условиям погоды на региональном уровне, а также будут способствовать принятию решений для разработки эффективных защитных мероприятий, в т. ч. профилактического характера, уточнять особенности формирования лесопожарной обстановки на территории Удмуртской Республики на основе коммерческих картографических данных и сервисов погоды.

Для достижения поставленной цели необходимо разработать инструментарий для мониторинга данных с использованием доступных погодных сервисов и картографических данных, собрать информацию за достаточно продолжительный период, выполнить анализ полученных данных в совокупности с зафиксированными случаями пожарной опасности. Кроме того, решается задача визуализации как КП с учетом его значения и направления ветра, так и количества возникших пожаров за 2011–2023 гг. на основе картографической библиотеки региона.

Базовым подходом для оценки пожарной опасности на территории России является расчет КП, который устанавливается для местности с неизменной совокупностью погодных данных для расчета показателя. В зависимости от его значения определяется класс пожарной опасности в лесах и регламентируется работа лесопожарных служб. Для вычисления КП необходимы следующие

данные: температура воздуха, точка росы ($^{\circ}\text{C}$), скорость ветра (м/с) на 13 ч по местному времени или, в соответствии с приказом Рослесхоза от 05.07.2011 № 287, по состоянию на 12–14 ч, а также количество выпавших осадков за предыдущие сутки (мм).

Ограничение данного подхода заключается в том, что расчеты не учитывают пирологические особенности таксационных выделов и динамику их изменения на местности. При данном КП в лесу по условиям погоды и конкретной силе ветра прогноз лучше осуществлять исходя из характера участков лесного фонда.

Очевидно, что пожар может возникнуть и при низком КП. Кроме того, в рамках одного и того же муниципального округа КП, скорее всего, будет значительно отличаться в связи с колебаниями температур, изменением направления ветра. Насколько значительна окажется разница, например, в пределах муниципального образования, представляет интерес, т. к. динамика погоды совместно с другими факторами неодинаковы между населенными пунктами внутри муниципалитета. В итоге, для того чтобы составить общее представление по пожарной опасности местности, нужно иметь выборку как можно более многих точек наблюдения. В пределах таких точек используемые в расчетах метеорологические параметры примерно равные и определяются особенностями конкретного погодного сервиса.

Удмуртская Республика представляет собой достаточно обширный регион. Координаты: $55^{\circ}12' - 58^{\circ}38'$ с. ш. $51^{\circ}10' - 54^{\circ}26'$ в. д. Протяженность территории с севера на юг составляет 297,5 км; с запада на восток – 200 км. Общая длина границ равна 1800 км [10]. Республика не отличается большим количеством лесных пожаров, кроме того, данные КП за прошедший период при выполнении исследования недоступны. В связи с этим шкалу по методике Н.П. Курбатского (1963), упомянутой в [4], на основе соотношения между ежедневными показателем В.Г. Нестерова и количеством возникающих пожаров построить затруднительно. Однако разработка такой шкалы для региона на основании предложенных в данной статье методов и подходов возможна в перспективе. Распределение и анализ частоты пожаров за 2011–2023 гг. будут представлены в последующих разделах и позволят сформировать понимание о различии в пожарной опасности в целом на территории Удмуртии.

Объекты и методы исследования

Для выбора методов исследования выполнен аналитический обзор работ в изучаемой области и существующих подходов к оценке пожарной опасности в лесах России и зарубежья. Объектом данного исследования стала динамика изменения КП в разрезе регионов Удмуртской Республики, наблюдаемая в контексте цифровой географической карты региона в течение 94 суток. Для вычисления КП использовалась методика, учитывающая количество выпавших осадков в зависимости от его фактического значения [8].

Как правило, для долговременного наблюдения за пожарной опасностью и принятия своевременных управленческих решений внедряют информационные системы. Примерами таких систем, в основу которых положена та или иная теория прогнозирования или методы сбора данных, можно назвать работы А.П. Зверева с коллегой [5], E. Chuvieco et al. [13] и R. Mavsar et al. [19]. В дан-

ной статье был принят такой же вектор исследований. Для отображения карты и сбора данных предложено программное приложение.

Подзадачи исследования, связанные с реализацией методов, следующие: выбор доступных API (программные интерфейсы приложений) для отслеживания массива погодных данных на территории Удмуртской Республики; установление функциональности приложения по мониторингу КП, как в целом, так и его модулей;

подготовка реестра населенных пунктов, входящих в состав муниципальных образований региона, по критерию доступности данных в конкретном сервисе погоды;

собственно разработка приложения с выбором шаблона проектирования, его отладкой и тестированием с целью оценки качества сбора данных и вычисления КП;

анализ данных и подготовка заключения.

Мониторинг динамики КП осуществлялся на основе ежедневно собираемого массива данных погоды, источником которых могут быть различные погодные службы. Профессиональные API сервисов погоды, как правило, закрыты для свободного доступа, что накладывает ограничение на проектирование систем мониторинга пожарной опасности в зависимости от погодных условий для исследовательских целей. Однако существуют погодные сервисы, которые предоставляют данные, достаточные для расчета КП, любому пользователю. Поэтому методы работы основаны на применении открытого программного обеспечения, актуальность которого находится на высоком уровне, и в отдельных случаях возможно применение данного программного обеспечения при разработке систем поддержки принятия решений в области лесных пожаров, например, [21]. Для отображения степени пожароопасности регионов обычно применяется графическая кластеризация по данным географических информационных систем. В представляемом исследовании использовались открытые библиотеки – картографическая OpenLayers v6.0 и сервис погоды OpenWeather (<https://openweathermap.org/>). Оперирование информацией картографической библиотеки OpenLayers совместно с другими инструментами геоинформационных технологий широко распространено. Так, она используется при отображении актуальной информации об очагах и характеристиках территорий в одной из провинций Индонезии [12]. Также OpenLayers API применяется европейской информационной системой о лесных пожарах (EFFIS), являющейся модульной системой поддержки принятия решений посредством отслеживания лесных пожаров в континентальном масштабе. Система в режиме реального времени предоставляет многомерные данные о лесных пожарах службам гражданской защиты и пожаротушения в Европе, Северной Африке и на Ближнем Востоке [20].

Погодный сервис OpenWeather имеет возможности отображения массива погодных данных для выбранного пункта наблюдения. Кроме того, у сервиса существует функция предоставления индекса пожарной опасности Fire Weather Index API [14, 16]. Этот индекс разработан для оценки текущей и прогнозной пожарной опасности. Таким образом, OpenWeather является надежным источником информации. С использованием данных этого сервиса в данной статье возможности мониторинга пожарной опасности были расширены благодаря учету направлений ветра, что позволяет оценивать пожарную

обстановку с принятием во внимание того, на какой стороне находится наблюдаемый район – наветренной или подветренной. Как утверждает источник [15], зачастую пожары случаются в результате переноса действующих пожаров с соседних земель.

С помощью сервиса OpenWeather определена доступность погодных данных для 210 населенных пунктов, входящих в состав 25 муниципальных образований Удмуртской Республики – от 5 до 12 населенных пунктов на одно образование.

Функциональность приложения, достаточная для решения поставленных задач, заключалась в следующем:

- отображение границ региона в целом и муниципальных образований, в т. ч. для выбранной пользователем части региона;

- выведение географической карты региона с указанием видов растительности, древесных пород, заболоченности и пр.;

- вычисление КП с представлением в виде цветных маркеров в зависимости от его значения и направления ветра в наблюдаемом населенном пункте. Цвет маркеров устанавливался в соответствии с ГОСТ Р 22.1.09–99 «БЧС. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров» (рис. 1);

- сравнительное отображение в виде столбчатых диаграмм вычисленных значений КП для населенных пунктов, образующих выбранный пользователем муниципальный округ;

- предоставление краткой аналитической справки о лесопожарной опасности в регионе – максимальное/минимальное значения КП, количество случаев выпадения осадков, приведших к обнулению КП в населенных пунктах региона;

- выгрузка данных в формате .json для последующего анализа.

В качестве общего шаблона использован шаблон проектирования MVVM: модель (Model) – представление (View) – модель представления (ViewModel). Основная цель данного шаблона заключается в разделении приложения на 3 независимых блока с соответствующей функциональностью. Первый слой представляет собой логику обращения с данными, необходимыми для работы приложения, и базой данных (в нашем случае это память браузера IndexedDb). Второй блок – графический интерфейс (отображаемая карта, кнопки, столбчатые диаграммы и пр.), являясь «подписчиком» на событие изменения значений свойств, источник данных о которых – модель представления, он взаимодействует с последней путем запросов. Модель представления – связующее звено между первым и вторым блоками. Более подробное описание данного шаблона с точки зрения программирования выходит за пределы данной статьи и может быть найдено в специальной литературе.

Оценка качества сбора данных показала, что вычисление КП для всех населенных пунктов осуществляется без сбоев. На этапе тестирования решалась задача по установлению дня, который принимался за начальную точку наблюдений. Сбор КП можно проводить сразу, но его наблюдаемое значение не соответствует «истинному», свойственному данному погодному сервису. Поэтому наблюдаемое значение принималось в качестве истинного в день, когда в данном населенном пункте произошло «обнуление» КП в связи с выпавшими осадками. Сброс КП в зависимости от количества осадков за последние 24 ч подробно описан Л.И. Сверловой [8].

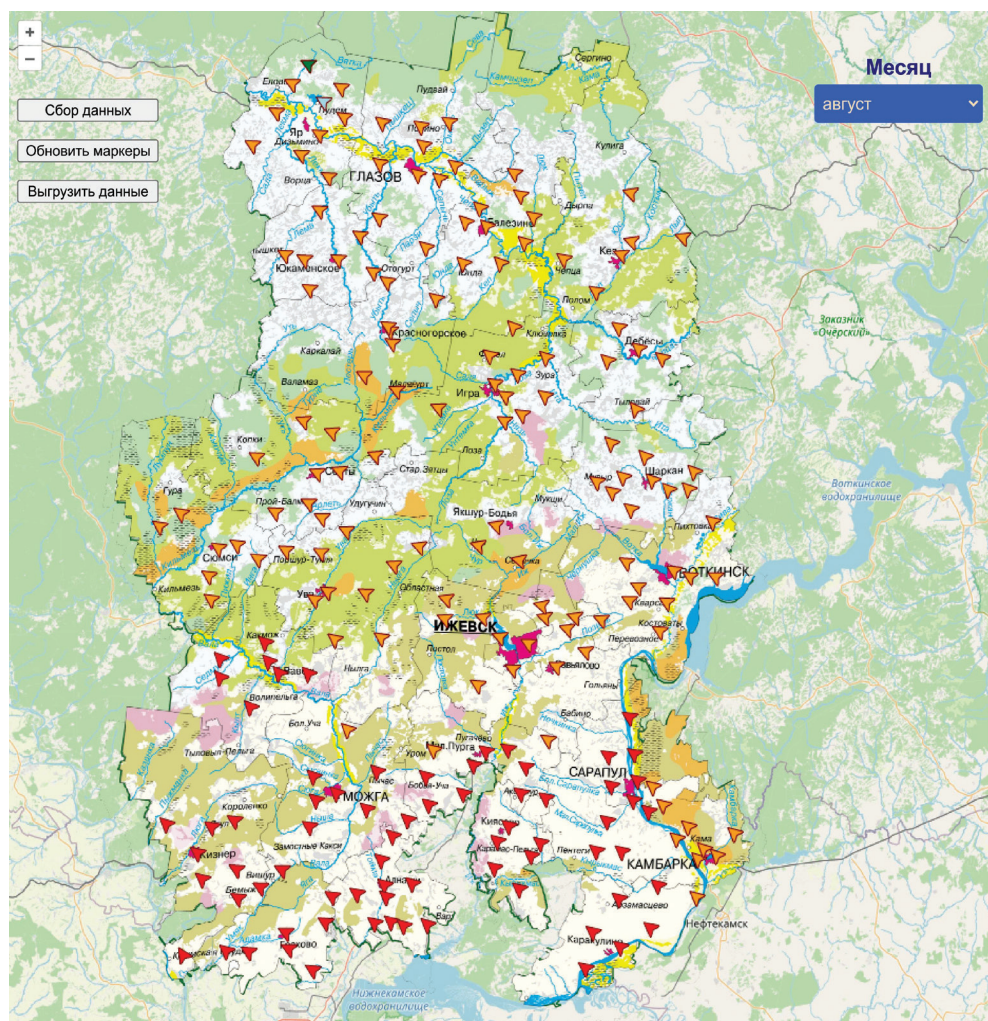


Рис. 1. Отображение маркеров КП на карте приложения на 26.08.2023 г.

Fig. 1. The display of markers of the comprehensive fire hazard indicator on the application map as of 26.08.2023

КП вычислялся по формуле:

$$\text{КП} = \sum_{i=1}^n K_v T(T - t),$$

где n – порядковый номер дня наблюдения; K_v – коэффициент, учитывающий скорость ветра; T , t – температура воздуха и точки росы соответственно.

Ежедневным сбором данных и расчетом установлено, что для 95,2 % наблюдаемых населенных пунктов день отсчета КП наступил через 12 дней. То есть на 13-е сутки наблюдений сброс значений КП уже произошел для всех муниципальных образований, за исключением двух, и данные были готовы для накопления и последующего анализа. Пример роста КП и случаев его сброса за период наблюдения представлен на рис. 2 для г. Ижевска. График получен в результате обработки данных, выгруженных из предлагаемого приложения.

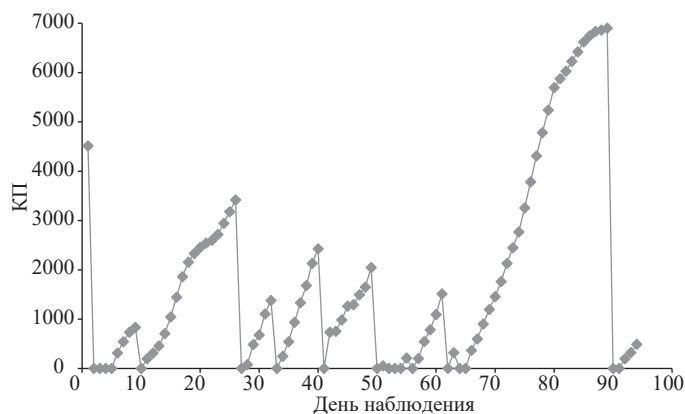


Рис. 2. Динамика изменения КП для г. Ижевска за 30.05.–01.09.2023 г.
Fig. 2. The dynamics of changes in the comprehensive fire hazard indicator for the city of Izhevsk for 30.05–01.09.2023

В идеальном случае предполагалось, что маркеры КП будут относиться к точкам местности, на которой обозначены виды растительности, отдельно – древесных пород, наличие/отсутствие болот, торфяников и т. п. Однако такая реализация ограничена отсутствием погодных данных для точек наблюдения, имеющих соответствующие геокоординаты. Приемлемым вариантом решения данной проблемы стало «наложение» растровой карты на исходный слой цифровой карты в OpenLayers. Данный подход носит экспериментальный характер и в перспективе может стать основой для анализа взаимосвязи КП, случаев возгораний и пирологических свойств растительности на местности в муниципальных образованиях региона.

К сожалению, в исследовании не удалось сравнить «истинное» значение КП с получаемым с помощью OpenWeather. Если бы погодные данные запрашивались другим способом, например, через коммерческие Gismeteo API или API Яндекс.Погоды, то существовала бы вероятность отличия результирующих данных между собой. Однако было принято предположение, что сбор данных в одно время в течение многодневного периода наблюдений и посредством одного погодного сервиса позволит получить показатели, с достаточной точностью удовлетворяющие цели исследования.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью специально разработанного инструмента для многодневного наблюдения за КП на территории Удмуртской Республики были установлены особенности его изменения в различных муниципальных образованиях. Во-первых, было обнаружено, что в пределах муниципального образования изменение КП вариативно, разница между значениями в населенных пунктах доходит до 100 %. Пример представлен на рис. 3. В скобках для населенных пунктов указано количество раз «сброса» КП вследствие достаточного количества выпавших осадков.

Отсюда следует, что для увеличения точности карты пожарной опасности в регионе нужно учитывать большее количество данных, которые могут быть получены с профессиональных коммерческих сервисов погоды и обработаны посредством современных подходов. По данным территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Удмуртской Республике насчитывается 1955 сельских населенных пунктов (по данным на 1 января 2022 г.).

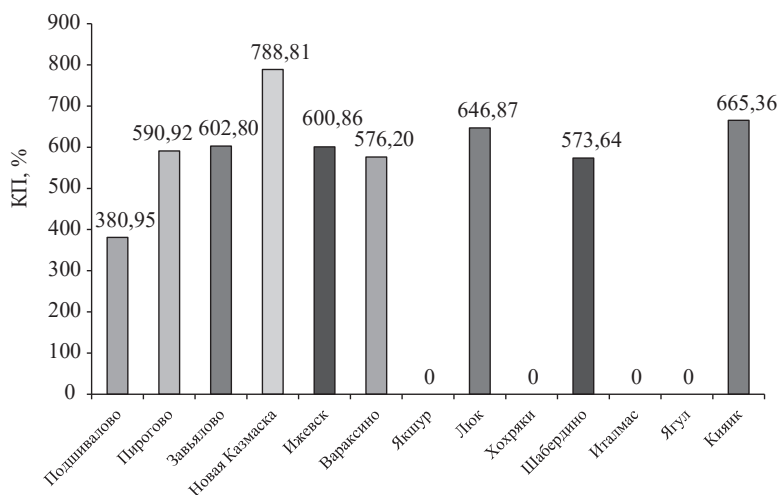


Рис. 3. Пример изменения КП в пределах Завьяловского района Удмуртской Республики на 05.08.2023: Подшивалово (13), Пирогово (13), Завьялово (12), Новая Казмаска (13), Ижевск (13), Вараксина (13), Якшур (14), Люк (15), Хохряки (15), Шабердино (13), Итамас (15), Ягул (15), Кияик (16)

Fig. 3. An example of a change in the comprehensive fire hazard indicator within the Zavyalovsky District of the Udmurt Republic as of 05.08.2023: Podshivalovo (13), Pirogovo (13), Zavyalovo (12), Novaya Kazmaska (13), Izhevsk (13), Varaksino (13), Yakshur (14), Lyuk (15), Kokhryakhi (15), Shaberdino (13), Italmas (15), Yagul (15), Kiyaiik (16)

Впервые установлен характер изменения КП в регионе по отношению к его протяженности, как по широте, так и по долготе. Статистическая обработка данных осуществлялась в MS Excel. Необходимо было получить ответ на вопрос о наличии корреляции между долготой/широтой пунктов наблюдения и КП. Построены диаграммы рассеяния 2 видов: «долгота–КП» и «широта–КП». Коэффициент корреляции вычислялся по формуле выборочного коэффициента корреляции Пирсона.

Диаграмма рассеяния КП для долготы за исследованный интервал времени представлена на рис. 4. По оси OY расположены суммы накопленных КП перед их обнулением для каждого населенного пункта (слагаемые сумм КП являются пиками по рис. 2). По оси OX отображены позиции координат долготы населенных пунктов в порядке убывания. То есть, чем ниже значение долготы, тем больше порядковый номер населенного пункта в рейтинге из 210 наименований. Перед вычислением коэффициента корреляции из выборки были удалены 4 выброса – в расчет попали только 206 населенных пунктов.

Установлено, что коэффициент корреляции Пирсона для данных рис. 4 равен 0,88. В случае использования линейной интерполяции зависимость изменения суммарных значений КП можно описать линейным уравнением типа $kx + b$.

Подобные шаги вычислений коэффициента для широты дают значение 0,31. В соответствии со шкалой Чеддока, представленной у С.С. Бондарчука с коллегой [1], для первого случая сила связи высокая, для второго – низкая.

Далее систематизировано сезонное распределение лесных пожаров (рис. 5), из которого следует, что максимальное количество пожаров приходится на май.

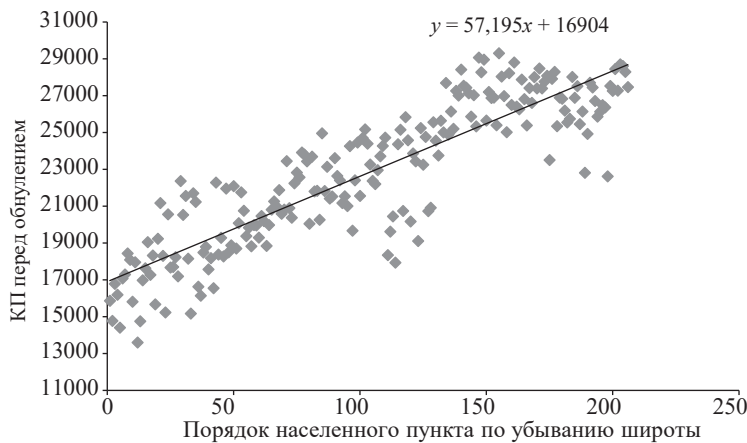


Рис. 4. Диаграмма рассеяния накопленных значений КП по мере убывания широты населенного пункта Удмуртской Республики

Fig. 4. The scatter diagram of accumulated comprehensive fire hazard indicator values as the latitude of a locality in the Udmurt Republic decreases

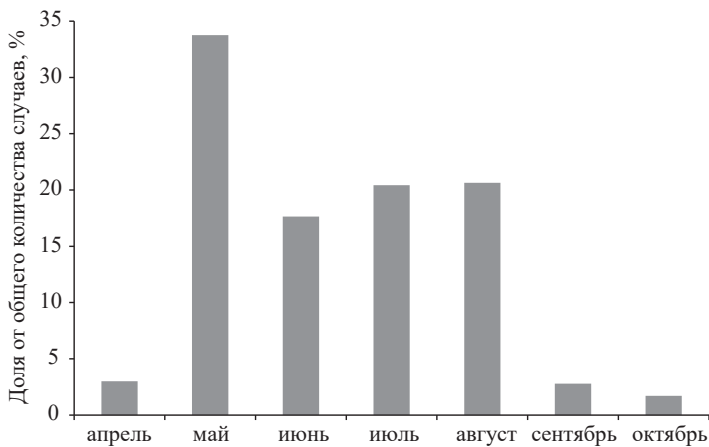


Рис. 5. Сезонное распределение лесных пожаров по Удмуртской Республике за 2011–2023 гг. (<https://minpriroda-udm.ru/lesnye-pozhary.html>)

Fig. 5. The seasonal distribution of forest fires in the Udmurt Republic for 2011–2023 (<https://minpriroda-udm.ru/lesnye-pozhary.html>)

Анализ случаев возникновения лесных пожаров за 2011–2023 гг. позволил выявить основные зоны аккумуляции возгораний в Удмуртской Республике в виде визуальных экранных форм в привязке к карте местности. Разработанное приложение отобразило данные рис. 5 непосредственно на карте исследуемого субъекта. Такая визуализация в привязке к муниципальным образованиям помогает лучше понять общую картину распределения пожаров, а в случае наличия данных по причинам пожаров будет способствовать разработке эффективных мер минимизации пожарных рисков в лесах. При отображении распределения лесных пожаров на карте (рис. 6), например, за май, следует, что ключевое сосредоточение лесных пожаров наблюдается в восточной и юго-восточной частях республики, не отличающихся большими площадями лесов.

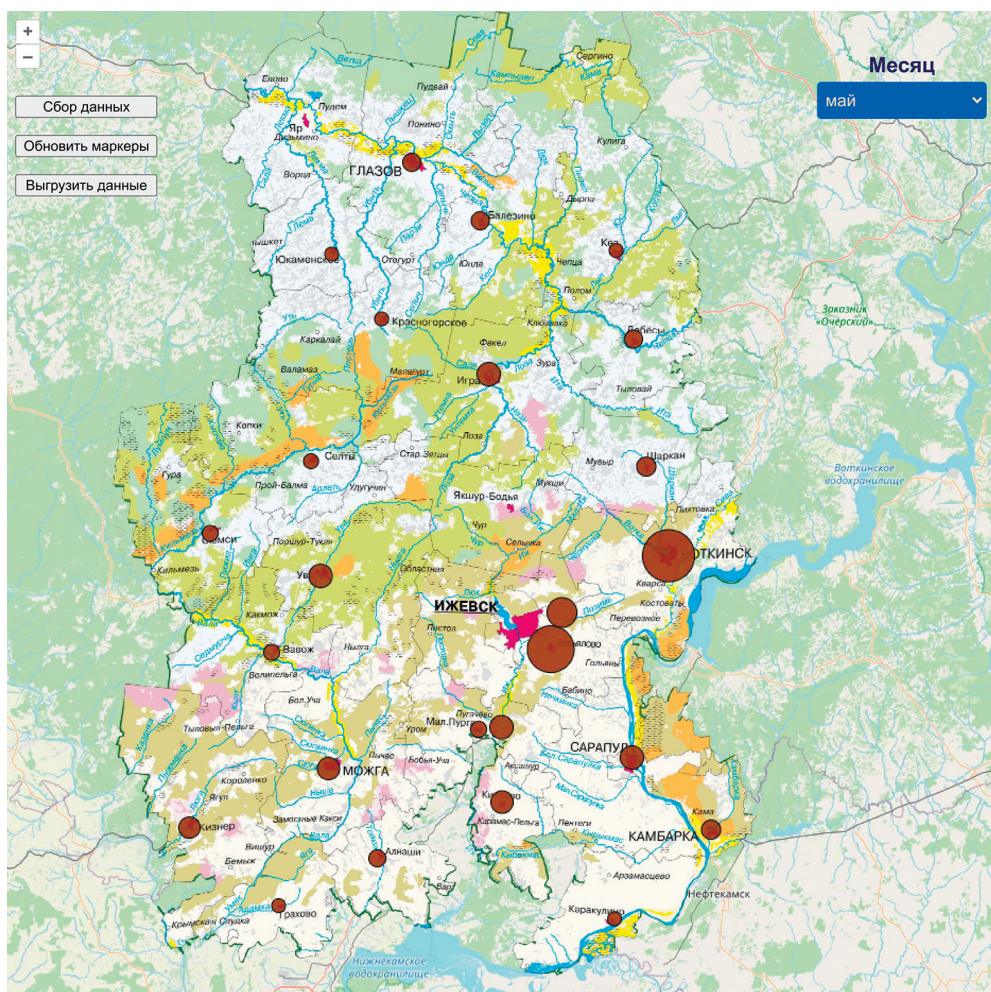


Рис. 6. Распределение лесных пожаров в Удмуртской Республике по муниципальным образованиям за май периода 2011–2023 гг.

Fig. 6. The distribution of forest fires in the Udmurt Republic by municipalities in May for the period of 2011–2023

Заклучение

Проанализирован комплексный показатель пожарной опасности для территории Удмуртской Республики. Интервал наблюдения, реализованный с помощью спроектированного приложения, охвативший период с 30.05.2023 по 01.09.2023, составил 94 дня. Источником массивов погодных данных для 210 населенных пунктов, участвующих в расчете, стал онлайн сервис OpenWeather, в качестве картографической библиотеки использовался OpenLayers v6. В работе преследовалась цель изучения динамики изменения КП по территории региона.

Использована методика, в которой заложено, что комплексный показатель пожарной опасности сбрасывается, т. е. принимает нулевое значение, когда за предыдущие сутки пройдет определенное количество осадков. Чем больше комплексный показатель, тем большее количество осадков должно выпасть. Тем не менее, эти более жесткие условия обнуления по сравнению с приказом

Рослесхоза от 05.07.2011 № 287 в результате выполненных исследований показали, что изменение комплексного показателя пожарной опасности наблюдается по долготе Удмуртской Республики. Иными словами, в южных широтах перед сбросом комплексный показатель имеет большее значение, чем в северных. Предположение, которое следует из этого наблюдения, заключается в том, что прямая, описывающая линейную интерполяцию данных изменений, из года в год будет иметь разный угол наклона.

Также было выявлено, что в пределах каждого из 25 муниципальных образований республики вариация комплексного показателя значительна и определяется количеством выпадающих осадков, температурой, а в целом динамикой погоды, не подчиняющейся административно-территориальному делению.

Ретроспективный анализ количества случаев лесных пожаров позволил установить, что большее число пожаров в период с апреля по октябрь приходится на май – 33,8 % всех возгораний за 2011–2023 гг., а источники возгораний принадлежат к муниципальным образованиям, центром которых являются крупные города. Поэтому, возможно, основные причины пожаров будут обусловлены антропогенным фактором.

Картографическая интерпретация проанализированных данных и подход, использованный в работе для их сбора, в перспективе с привязкой к карте растительности региона позволили бы оценить вероятность возникновения лесного пожара как в связи со значением КП, так и с учетом пирологических описаний таксационных выделов и причин, вызвавших пожары в прошлом. При ежегодных наблюдениях за комплексным показателем и наличии актуальной карты растительности реализовать подобный метод исследования возможно для любого региона России. Кроме того, совокупность результатов, полученных при помощи технологий детектирования температурных аномалий по данным спутниковых приборов, выявляющих факты действительного возгорания, и расчетных подходов станут основой теории построения прогнозных моделей возгорания. Однако при этом комплексный показатель должен соответствовать местоположению очага. Итоги исследования могут способствовать разработке и проведению мероприятий по предупреждению лесных пожаров и снижению ущерба от них в рамках общей системы наблюдения и контроля на региональном уровне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бондарчук С.С., Бондарчук И.С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel. Томск: Том. гос. педагогич. ун-т, 2018. 433 с.

Bondarchuk S.S., Bondarchuk I.S. *Statistical Processing of Experimental Data in MS Excel*. Tomsk, Tomsk State Pedagogical University Publ., 2018. 433 p. (In Russ.).

2. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В., Клепо Е.А., Попков С.Ю., Иванова О.В. Комплексный показатель пожарной опасности в сельской местности России // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2016. № 2. С. 48–53.

Brushlinsky N., Sokolov S., Klepko E., Popkov S., Ivanova O. A Complex Index of Fire Risks in Rural Areas of Russia. *Pozhary i chrezvychajnye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2016, no. 2, pp. 48–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2016.2.48-53>

3. Волков С.Н., Налепин В.П., Дружининская К.А. Пожарная безопасность в лесах Тарногского лесничества Вологодской области // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. 2021. № 1(47). С. 29–33.

Volkov S.N., Nalepin V.P., Druzhininskaya K.A. Efire Safety in the Forests of the Tarnogsky Forestry of the Vologda Region. *Teoreticheskie i prikladnye problem agropromyshlennogo kompleksa* = Theoretical & Applied Problems of Agro-Industry, 2021, no. 1(47), pp. 29–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.32935/2221-7312-2021-47-1-29-33>

4. Волокитина А.В., Софронова Т.М., Корец М.А. Региональные шкалы оценки пожарной опасности в лесу: усовершенствованная методика составления // Сиб. лесн. журн. 2016. № 2. С. 52–61.

Volokitina A.V., Sofronova T.M., Korets M.A. Regional Scales of Fire Danger Rating in the Forest: Improved Technique. *Sibirskij lesnoj zhurnal* = Siberian Journal of Forest Science, 2016, no. 2, pp. 52–61. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20170206>

5. Зверев А.П., Нурмагомедов Т.Н. Система поддержки принятия решений для предупреждения торфяных пожаров // Изв. Тульск. гос. ун-та. Науки о Земле. 2021. № 2. С. 30–37.

Zverev A.P., Nurmagomedov T.N. Decision Support System for Peat Fire Prevention. *Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o zemle*, 2021, no. 2, pp. 30–37. (In Russ.).

6. Подрезов Ю.В. Основные направления предупреждения чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 172–182.

Podrezov Yu.V. Principal Directions for Prevention of Emergency Fire Situations in Forests. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 2, pp. 172–182. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-172-182>

7. Раимбеков К.Ж. Комплексный показатель пожарной опасности сельской местности Республики Казахстан // Пожаровзрывобезопасность. 2016. Т. 25, № 5. С. 52–56.

Raimbekov K.Zh. Complex Index of Fire Danger Rural Areas of the Republic of Kazakhstan. *Pozharovzryvobezопасnost'* = Fire and Explosion Safety, 2016, vol. 25, no. 5, pp. 52–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.18322/PVB.2016.25.05.52-56>

8. Сверлова Л.И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года: метод. пособие. Хабаровск: Даль НИЦ Дальневост. УГМС, 2000. 48 с.

Sverlova L.I. *Method of Assessing Fire Hazard in Forests Based on Weather Conditions, Taking into Account Atmospheric Aridity Zones and Seasons of the Year*: Handbook. Khabarovsk, Far Eastern Research Center of the Far Eastern Administration of the Hydrometeorological Service, 2000. 48 p. (In Russ.).

9. Тимофеева С.С., Гармышев В.В., Астраханцева А.Ю. Сравнительный анализ экологических рисков природных пожаров на территории Байкальского региона // Безопасность техногенных и природных систем. 2022. № 4. С. 22–29.

Timofeeva S.S., Garmyshev V.V., Astrakhantseva A.Yu. Comparative Analysis of Environmental Risks of Wildfires in the Baikal Region. *Bezопасnost' tekhnogennykh i prirodnnykh system* = Safety of Technogenic and Natural Systems, 2022, no. 4, pp. 22–29. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2022-4-22-29>

10. Удмуртская Республика: Энциклопедия. Ижевск: Удмуртия, 2000. 800 с.

The Udmurt Republic: Encyclopedia. Udmurtia, Izhevsk, 2000. 800 p. (In Russ.).

11. Alves D., Almeida M., Viegas D.X., Novo I., Luna M.Y. Fire Danger Harmonization Based on the Fire Weather Index for Transboundary Events between Portugal and Spain. *Atmosphere*, 2021, vol. 12, no. 9, art. no. 1087. <https://doi.org/10.3390/atmos12091087>

12. Amri K., Sitanggang I.S. A Geographic Information System for Hotspot Occurrences Classification in Riau Province Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 2015, vol. 24, pp. 127–131. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.03.017>

13. Chuvieco E., Aguado I., Yebra M., Nieto H., Salas J., Pilar Martín M., Vilar L., Martínez J., Martín S., Ibarra P., de la Riva J., Baeza J., Rodríguez F., Molina J.R., Herrera M.A., Zamora R. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using

Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*, 2010, vol. 221, iss. 1, pp. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>

14. *Fire Weather Index API*. OpenWeather Website. Available at: <https://docs.open-weather.co.uk/api/fire-index-api> (accessed 20.05.23).

15. Joint Research Centre (European Commission), San-Miguel-Ayanz J., Durrant T., Boca R., Libertà G., Branco A., De Rigo D., Ferrari D., Maiani P., Artés Vivancos T., Oom D., Pfeiffer H., Nuijten D., Leray T., Benichou A., Abbas M., Humer F., Vacik H., Müller M., Konstantinov V., Pešut I., Kaliger A., Petkoviček S., Papageorgiou K., Toumasis I., Pecl J., Ruuska R., Chassagne F., Joannelle P., Gonschorek A., Theodoridou C., Debreceni P., Nagy D., Nugent C., Zaken Avi B., Di Fonzo M., Sciunnach R., Micillo G., Fresu G., Marzoli M., Ascoli D., Leisavnieks E., Jaunķis Z., Mitri G., Repšienė S., Glazko Z., Assali F., Mharzi Alaoui H., Kok E., Stoof C., Maren van A.-J., Timovska M., Botnen D., Piwnicki J., Szczygieł R., Moreira J., Pereira T., Cruz M., Sbirnea R., Mara S., Eritsov A., Longauerová V., Jakša J., Lopez-Santalla A., Sandahl L., Beyeler S., Conedera M., Pezzatti B., Dursun K.T., Baltaci U., Gazzard R., Moffat A., Sydorenko S. *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018*. Publications Office of the European Union, 2019. <https://doi.org/10.2760/1128>

16. Lawson B.D., Armitage O.B. *Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Alberta, Edmonton, Northern Forestry Centre, Canadian Forest Service, Natural Resources Canada. 84 p.

17. Li X., Zhao G., Yu X., Yu Q. A Comparison of Forest Fire Indices for Predicting Fire Risk in Contrasting Climates in China. *Natural Hazards*, 2014, no. 70, pp. 1339–1356. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0877-6>

18. Masinda M.M., Li F., Qi L., Sun L., Hu T. Forest Fire Risk Estimation in a Typical Temperate Forest in Northeastern China Using the Canadian Forest Fire Weather Index: Case Study in Autumn 2019 and 2020. *Natural Hazards*, 2022, vol. 111, pp. 1085–1101. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05054-4>

19. Mavsar R., González Cabán A., Varela E. The State of Development of Fire Management Decision Support Systems in America and Europe. *Forest Policy and Economics*, 2013, vol. 29, pp. 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2012.11.009>

20. McInerney D., San-Miguel-Ayanz J., Corti P., Whitmore C., Giovando C., Camia A. Design and Function of the European Forest Fire Information System. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2013, no. 10, pp. 965–973(9). <https://doi.org/10.14358/PERS.79.10.965>

21. Rodriguez Aseretto D., Di Leo M., de Rigo D., Corti P., McInerney D., Camia A., San-Miguel-Ayanz J. Free and Open Source Software Underpinning the European Forest Data Centre. *Geophysical Research Abstracts*, 2013, vol. 15, art. no. 12101. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.155700>

22. Safi Y., Bouroumi A. Prediction of Forest Fires Using Artificial Neural Networks. *Applied Mathematical Sciences*, 2013, vol. 7, no. 5-8, pp. 271–286. <https://doi.org/10.12988/ams.2013.13025>

23. Satir O., Berberoglu S., Donmez C. Mapping Regional Forest Fire Probability Using Artificial Neural Network Model in a Mediterranean Forest Ecosystem. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2016, vol. 7, iss. 5, pp. 1645–1658. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1084541>

24. Sevinç V. Mapping the Forest Fire Risk Zones Using Artificial Intelligence with Risk Factors Data. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, vol. 30, pp. 4721–4732. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22515-w>

Конфликт интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The author declares that there is no conflict of interest