

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.50>

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И АНАЛИЗА ДИНАМИКИ
ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Научная статья

Маглинец Ю.А.¹, Раевич К.В.², Брежнев Р.В.³, Шатров Р.А.^{4*}, Михалев А.С.⁵, Антипова Е.А.⁶, Матюнин В.М.⁷

¹ ORCID : 0000-0002-9123-9281;

² ORCID : 0000-0003-2794-6026;

³ ORCID : 0000-0001-6800-5244;

⁴ ORCID : 0009-0001-6158-6231;

⁵ ORCID : 0000-0002-8986-5953;

⁶ ORCID : 0009-0007-1783-3980;

⁷ ORCID : 0009-0009-2585-6570;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (322jioepti4ka[at]gmail.com)

Аннотация

В данной статье рассматривается разработка и внедрение комплексной системы обнаружения и анализа динамики лесных пожаров на основе нейронных сетей и алгоритмов сегментации. Основной целью работы является создание алгоритма для анализа изменений на спутниковых снимках с использованием свёрточных нейронных сетей, а также разработка интерфейса для визуализации и оценки результатов анализа. В работе представлены методы обработки изображений, включающие сравнение снимков и выделение областей возгорания. Экспериментальная проверка системы на реальных данных показала высокую точность в детектировании пожаров и корректное определение направлений распространения огня. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и его применимость в задачах мониторинга и предупреждения лесных пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, спутниковые снимки, обработка изображений, детектирование пожаров, нейронные сети, сегментация пожаров, динамика распространения пожаров, визуализация.

CONCEPTUAL DESIGN OF A SYSTEM FOR MONITORING AND ANALYSING FOREST FIRE DYNAMICS

Research article

Maglinets Y.A.¹, Raevich K.V.², Brezhnev R.V.³, Shatrov R.A.^{4*}, Mikhalev A.S.⁵, Antipova E.A.⁶, Matyunin V.M.⁷

¹ ORCID : 0000-0002-9123-9281;

² ORCID : 0000-0003-2794-6026;

³ ORCID : 0000-0001-6800-5244;

⁴ ORCID : 0009-0001-6158-6231;

⁵ ORCID : 0000-0002-8986-5953;

⁶ ORCID : 0009-0007-1783-3980;

⁷ ORCID : 0009-0009-2585-6570;

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

* Corresponding author (322jioepti4ka[at]gmail.com)

Abstract

This article examines the development and implementation of an integrated system for detecting and analysing forest fire dynamics based on neural networks and segmentation algorithms. The main objective of the work is to create an algorithm for analysing changes in satellite images using convolutional neural networks, and to develop an interface for visualizing and evaluating the analysis results. The paper presents image processing techniques including image comparison and fire region extraction. Experimental validation of the system on real data showed high accuracy in fire detection and correct determination of fire spreading directions. The obtained results confirm the effectiveness of the proposed approach and its applicability in the tasks of forest fire monitoring and prevention.

Keywords: forest fires, satellite images, image processing, fire detection, neural networks, fire segmentation, fire spread dynamics, visualization.

Введение

Лесные пожары представляют собой одну из наиболее опасных природных катастроф, способных нанести значительный ущерб экосистемам, экономике и даже человеческим жизням [1]. Каждый год во многих регионах мира происходят пожары, которые уничтожают тысячи гектаров леса, наносят вред биоразнообразию и приводят к выбросу огромного количества углекислого газа в атмосферу. В связи с глобальными изменениями климата и усилением засушливых условий, частота и интенсивность лесных пожаров увеличиваются, что делает задачу их раннего обнаружения и мониторинга более актуальной, чем когда-либо.

Раннее обнаружение лесных пожаров является критически важным, так как даже небольшое промедление может привести к катастрофическим последствиям. В то время как традиционные методы мониторинга, такие как

наблюдение с земли или использование воздушных судов, остаются важными, они имеют ряд ограничений, включая высокие затраты и ограниченную зону охвата [2]. В последние годы всё более широкое распространение получают технологии дистанционного зондирования, включая спутниковые системы и беспилотные летательные аппараты, которые способны охватывать большие площади и предоставлять данные в реальном времени [3].

Однако сам по себе сбор данных недостаточен для эффективного управления пожарами. Важную роль играет способность быстро и точно анализировать полученную информацию, чтобы оперативно принимать решения. В этом контексте методы анализа данных, основанные на искусственном интеллекте, становятся незаменимым инструментом. В частности, нейронные сети, являющиеся одним из основных направлений ИИ, показывают высокую эффективность в задачах классификации и детектирования лесных пожаров. Эти модели способны анализировать огромные объемы данных и с высокой точностью определять, где и когда может возникнуть пожар.

Методы на основе ИИ имеют значительное преимущество перед традиционными подходами благодаря своей способности учиться на больших наборах данных и адаптироваться к меняющимся условиям [4]. Например, глубокие нейронные сети могут быть обучены распознавать не только явные признаки пожаров, такие как пламя и дым, но и более скрытые признаки, которые могут указывать на начальную стадию возгорания. Это позволяет обнаруживать пожары на самых ранних стадиях, что значительно увеличивает шансы на их быстрое тушение.

Целью данной работы является разработка комплексной системы, способной эффективно обнаруживать и анализировать динамику развития лесных пожаров на основе изображений высокого разрешения. В статье описываются основные этапы разработки системы: от архитектуры алгоритма и выбора методик обработки изображений до реализации графического интерфейса пользователя.

Алгоритм обнаружения лесных пожаров

Введение технологий искусственного интеллекта в задачи мониторинга окружающей среды, особенно в контексте предотвращения и контроля лесных пожаров, открывает новые горизонты для автоматизации и повышения точности выявления потенциальных угроз. Особое внимание заслуживают глубокие нейронные сети, в частности свёрточные нейронные сети, которые демонстрируют высокую эффективность в обработке изображений и извлечении сложных визуальных признаков [5]. В данном исследовании представлены результаты разработки и обучения свёрточной нейронной сети, предназначенной для бинарной классификации изображений с целью обнаружения лесных пожаров.

Для разработки свёрточной нейронной сети была получена выборка спутниковых снимков с космического спутника «Арктика-М» за 2023 год. На полученных вручную сценах были выделены области с пожарами. Эти области были разбиты на изображения размерностью 49 на 49 пикселей. Примеры изображений приведены на рисунках 1-2.



Рисунок 1 - Примеры кадров с пожаром
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.50.1>



Рисунок 2 - Примеры кадров без пожара
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.50.2>

Этап предобработки включал нормализацию изображений (масштабирование пиксельных значений в диапазон [0, 1]) и аугментацию тренировочных данных с использованием таких трансформаций, как повороты, сдвиги, масштабирование и горизонтальные отражения. Аугментация позволила значительно увеличить вариативность тренировочных данных и, как следствие, повысить обобщающую способность модели.

Для классификации изображений была разработана свёрточная нейронная сеть, архитектура которой включает несколько свёрточных слоев с нарастающим количеством фильтров (32, 64 и 128), что позволяет модели последовательно выделять все более сложные признаки, начиная от базовых геометрических форм и заканчивая высокоуровневыми паттернами, характерными для сцен с присутствием огня. Каждый свёрточный слой использует фильтры размером 3x3 и функцию активации ReLU, что способствует обучению модели. После каждого свёрточного блока применяется слой подвыборки (MaxPooling) с размером окна 2x2, что позволяет уменьшить размерность признаков, снизить риск переобучения и сохранить наиболее значимые характеристики изображения.

После свёрточных слоев данные преобразуются в одномерный вектор, который поступает в полносвязный слой с 512 нейронами. Функция активации ReLU в этом слое обеспечивает эффективное обучение модели для выделения сложных признаков, необходимых для точной классификации. Завершающим элементом архитектуры является выходной слой с одним нейроном и сигмоидной функцией активации, который возвращает вероятность принадлежности изображения к одному из двух классов: «пожар» или «отсутствие пожара».

Процесс обучения модели был осуществлен с использованием алгоритма оптимизации Adam, который обеспечивает быструю и стабильную сходимость благодаря адаптивной скорости обучения и комбинированию моментов. В качестве функции потерь применялась бинарная кросс-энтропия, которая является стандартом для задач двоичной классификации. Для предотвращения переобучения использовались методы ранней остановки и сохранения наилучшей модели, контролирующие значение функции потерь на валидационных данных, что обеспечивало сохранение модели с минимальной ошибкой.

Результаты тестирования продемонстрировали, что разработанная модель достигает высокой точности при классификации изображений на наличие и отсутствие лесного пожара, подтверждая тем самым эффективность выбранной архитектуры и подходов к обучению. Точность обучения модели на тестовой выборке составляет 99,4%.

Таким образом, представленная в данном исследовании модель не только демонстрирует высокую точность детектирования лесных пожаров, но и обладает потенциалом для интеграции в существующие системы мониторинга, что может значительно повысить эффективность борьбы с этим видом природных катастроф. Перспективы дальнейшего развития включают улучшение архитектуры модели, расширение набора данных и адаптацию алгоритмов для работы в реальных условиях с использованием более сложных и разнообразных данных.

Динамика распространения лесных пожаров

Лесные пожары представляют собой сложное и многогранное явление, которое требует глубокого анализа для эффективного управления и минимизации ущерба. Хотя технологии искусственного интеллекта и компьютерного зрения достигли значительных успехов в обнаружении пожаров на ранних стадиях, одной из ключевых задач остается анализ динамики их распространения. Понимание того, как пожар движется, и выявление факторов, влияющих на это движение, может оказать существенную помощь в разработке стратегий по его сдерживанию и предотвращению [6].

Задача анализа динамики лесного пожара включает изучение пространственно-временных данных, полученных из различных источников, таких как спутниковые снимки, данные с беспилотных летательных аппаратов и наземных сенсоров. Эти данные позволяют моделировать движение огня по территории, учитывая такие факторы, как тип растительности, топография местности, погодные условия и наличие потенциальных препятствий [7].

На основе информации о текущем положении и интенсивности пожара можно построить модели его дальнейшего распространения [8]. Эти модели не только предсказывают путь огня, но и помогают определить, какие факторы оказывают наибольшее влияние на скорость и направление его движения. Например, анализируя траекторию пожара, можно выявить участки леса, где огонь распространяется быстрее всего, и связать это с особенностями местности или метеусловиями.

Знание о динамике распространения пожара открывает возможности для выявления причин, по которым пожар движется определенным образом. Это может включать анализ взаимодействия пожара с окружающей средой, влияние ветра и влажности, а также изучение изменений в интенсивности огня при переходе через различные типы растительности или при встрече с водными преградами [9].

Например, если пожар внезапно ускоряется при переходе через определенную область, это может свидетельствовать о присутствии в этой зоне легковоспламеняющегося материала, который способствует быстрому распространению огня. С другой стороны, замедление или изменение направления движения пожара может быть связано с появлением естественных барьеров, таких как реки или болота, или с изменением направления ветра.

Выявление таких закономерностей и причин является важным шагом в понимании природы лесных пожаров. Эти знания могут быть использованы для разработки более эффективных мер по предотвращению пожаров, например, путем создания защитных полос или использования специальных материалов, препятствующих распространению огня.

В рамках данного исследования будет представлен базовый алгоритм определения направления движения лесных пожаров. Результаты работы данного алгоритма далее будут использованы для исследования факторов, влияющих на распространение пожаров.

Алгоритм анализа динамики лесных пожаров

Основой анализа динамики лесных пожаров служит сегментация изображений, позволяющая точно определить области, затронутые огнем, и оценить их площадь на каждом этапе развития пожара. Использование спутниковых снимков дает возможность наблюдать за изменениями в масштабе и интенсивности пожара в динамике.

В исследовании для сегментации изображений лесных пожаров использован алгоритм порогового разделения по методу Йенга, который зарекомендовал себя как эффективный инструмент для автоматической бинаризации изображений [10]. Метод Йенга применяется в задачах, требующих четкого разделения областей на изображении на основе интенсивности пикселей. В контексте мониторинга лесных пожаров алгоритм позволяет выделять зоны, где существует вероятность возникновения возгораний, что делает его актуальным для данной области.

Метод Йенга относится к классу глобальных методов сегментации, основанных на статистическом анализе гистограммы изображения. В отличие от других методов, таких как алгоритм Оцу, метод Йенга минимизирует энтропию как внутри классов (объект и фон), так и между ними, что делает его подходящим для изображений с неоднородным распределением интенсивностей. Этот аспект особенно важен при работе с данными, где характер освещения и контраст могут значительно варьироваться, например, при анализе снимков лесных массивов.

Алгоритм работает следующим образом. Изображение, полученное в градациях серого, проходит через этап вычисления порогового значения, определяемого методом Йенга. Данное значение служит границей между областями, соответствующими возможным очагам возгорания, и остальной частью изображения. После вычисления порога изображение преобразуется в бинарное: пиксели с интенсивностью выше порога становятся белыми, а пиксели ниже порога – черными. Это позволяет получить четкое разделение на «объект» и «фон», где выделяются только те зоны, которые могут сигнализировать о присутствии пожара.

Пример работы алгоритма Йенга на спутниковых снимках представлен на рисунке 3.

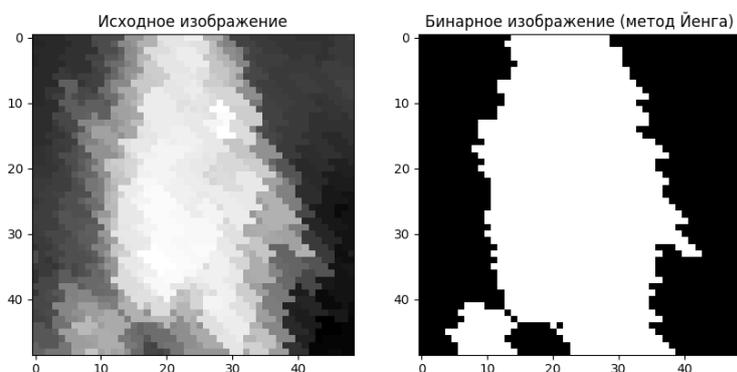


Рисунок 3 - Пример работы алгоритма Йенга для сегментации пожара

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.50.3>

После того как изображение сегментировано, можно приступить к количественной оценке площади, занятой пожаром. Для этого вычисляется площадь сегментированной области, представляющей пожар. Этот процесс повторяется для каждого снимка, полученного на разных стадиях развития пожара. Сравнение площадей, полученных в разные моменты времени, позволяет определить скорость распространения пожара, его направление и интенсивность.

Прототип системы мониторинга и анализа динамики лесных пожаров

Для визуализации и мониторинга динамики развития пожара было разработано настольное приложение. Основу системы составляют разработанные алгоритмы. Основная цель разработки заключается в создании средства, способного оценивать изменение площади и интенсивности лесных пожаров во времени и пространстве.

Система разработана на языке программирования Python с использованием библиотеки `Tkinter` для создания графического интерфейса. Интерфейс приложения позволяет пользователю выбирать список изображений для анализа, определяя начальную и конечную точки во временной последовательности спутниковых снимков в формате `.tif`. Для удобства работы изображения автоматически сортируются по временной метке, что существенно облегчает процесс работы с большими наборами данных.

Программный продукт включает несколько ключевых компонентов. Пользовательский интерфейс содержит элементы для выбора изображений, отображения исходных и обработанных данных, а также анимации изменений, которая позволяет наглядно проследить динамику распространения пожара в выбранный временной интервал. Анимация реализована с возможностью настройки задержки между кадрами, что дает пользователю гибкость в управлении скоростью визуализации. Интерфейс системы представлен на рисунке 4.

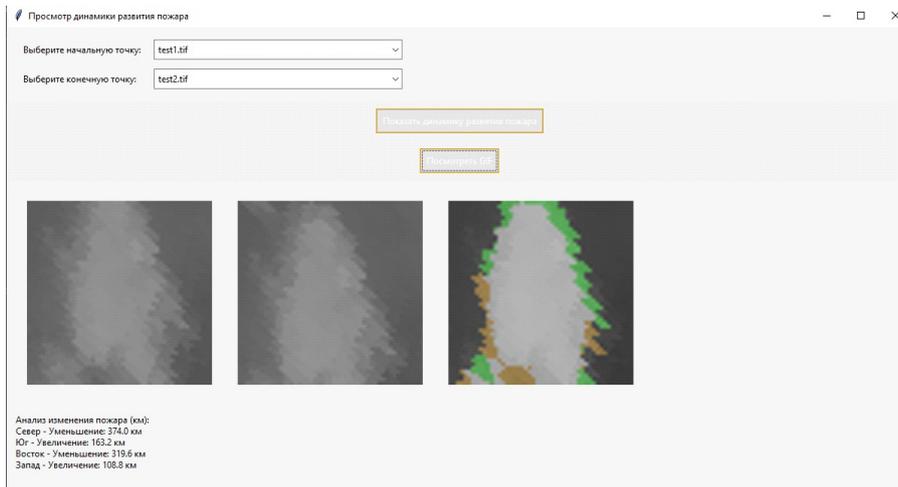


Рисунок 4 - Настольное приложение для визуализации динамики развития пожаров
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.50.4>

Основной алгоритм анализа изображений базируется на сравнении снимков. Для каждого пикселя выполняется проверка изменений, что позволяет выделить зоны, где пожар усиливается или затухает. Если пиксель изменяется от белого к черному, это свидетельствует о распространении огня; если наоборот, от черного к белому – о его уменьшении. Измененные области визуализируются с использованием цветовой кодировки: оранжевый цвет обозначает расширение зоны пожара, зеленый — сокращение. На следующем этапе система накладывает результаты анализа на исходное изображение, что позволяет получить интегрированную визуализацию изменений.

Кроме визуализации, система предоставляет текстовый анализ, который автоматически генерируется по результатам сравнения изображений. В отчете отображаются данные о том, насколько изменился пожар в различных направлениях: север, юг, восток и запад. Для перевода изменения пиксельных значений в километры используется заранее определенный коэффициент (1 пиксель \approx 3,4 км). Такой подход позволяет точно оценить масштабы изменений и направления распространения огня.

Для демонстрации работы системы был использован набор снимков, показывающих развитие пожара в течение нескольких дней. После выбора начальной и конечной точек система автоматически сформировала отчет, согласно которому пожар увеличился на 439 км на север, на 431,8 км на юг, на 374 км на восток и на 550,8 км на запад. Результаты работы системы представлены на рисунке 5.

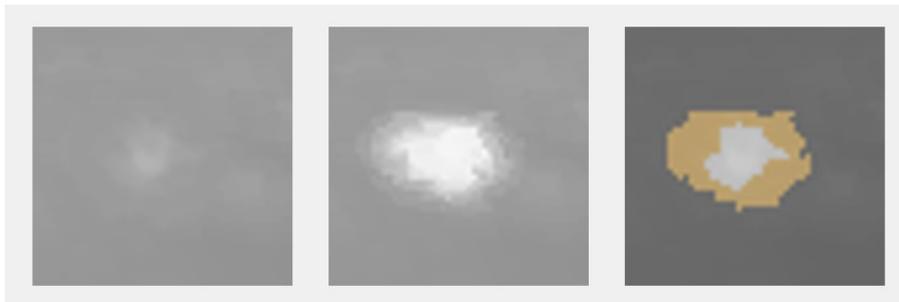


Рисунок 5 - Визуализация результатов работы алгоритма динамики развития пожара
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.148.50.5>

Заключение

Разработка и внедрение комплексной системы для обнаружения лесных пожаров и анализа их динамики на основе спутниковых снимков представляет собой значительный шаг вперед в управлении природными катастрофами. Использование современных методов, таких как нейронные сети для детектирования пожаров и алгоритмы сегментации для анализа их распространения, позволяет не только оперативно выявлять возгорания, но и глубоко понимать процессы их развития.

Система, способная обнаруживать пожары на ранних стадиях, значительно повышает шансы на быстрое реагирование и эффективное подавление огня до того, как он нанесет непоправимый ущерб экосистемам и населению. В сочетании с анализом динамики пожара, который позволяет прогнозировать его дальнейшее распространение и выявлять ключевые факторы, влияющие на его движение, такие системы могут стать незаменимыми инструментами для служб по борьбе с пожарами.

Использование спутниковых снимков, интегрированных с методами искусственного интеллекта, обеспечивает точный и надежный мониторинг больших территорий в режиме реального времени. Это критически важно для

своевременного реагирования в условиях, когда пожары становятся все более частым и разрушительным явлением, в том числе из-за изменений климата.

Финансирование

Исследование осуществлено при поддержке Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках проекта «Цифровая импортозамещающая технология обнаружения лесных пожаров на основе использования уникальной российской спутниковой группировки Арктика-М с последующей интеграцией с системой ИСДМ-Рослесхоз» (№ 2023031409613). Работы поддержаны из средств гранта в форме субсидии Научно-образовательного центра «Енисейская Сибирь» № 075-15-2023-620 от 29 августа 2023 г.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The research was supported by the Krasnoyarsk Regional Fund of Science and Technology Support as part of the project "Digital import-substituting technology for forest fire detection based on the use of the unique Russian satellite constellation Arktika-M with subsequent integration with the ISRM-Rosleskhoz system" № 2023031409613. The work was supported by a grant from the "Yenisei Siberia" Research and Education Centre № 075-15-2023-620 dated 29 August 2023.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Bowman D.M.J.S. Fire in the Earth system / D.M.J.S. Bowman, J. Balch, P. Artaxo [et al.] // *Science*. — 2009. — Vol. 324, № 5926. — P. 481–484.
2. Toth C. Remote sensing platforms and sensors: A survey / C. Toth, G. Józkóv // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. — 2016. — Vol. 115. — P. 22–36.
3. Хабаров Д.А. Анализ современных технологий дистанционного зондирования Земли / Д.А. Хабаров, А.В. Мартынов, Л.П. Петрова [и др.] // *Московский экономический журнал*. — 2019. — № 1. — С. 181–190.
4. LeCun Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // *Nature*. — 2015. — Vol. 521, № 7553. — P. 436–444.
5. Krizhevsky A. Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton // *Advances in neural information processing systems*. — 2012. — Vol. 25.
6. Rodrigues M. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression / M. Rodrigues, J. de la Riva, S. Fotheringham // *Applied Geography*. — 2014. — Vol. 48. — P. 52–63.
7. Castro R. Modeling Forest fire danger from geographic information systems / R. Castro, E. Chuvieco // *Geocarto International*. — 1998. — Vol. 13, № 1. — P. 15–23.
8. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models / A.L. Sullivan // *International Journal of Wildland Fire*. — 2009. — Vol. 18, № 4. — P. 369–386.
9. Viegas D.X. Slope and wind effects on fire propagation / D.X. Viegas // *International Journal of Wildland Fire*. — 2004. — Vol. 13, № 2. — P. 143–156.
10. Yen J.C. A new criterion for automatic multilevel thresholding / J.C. Yen, F.J. Chang, S. Chang // *IEEE Transactions on Image Processing*. — 1995. — Vol. 4, № 3. — P. 370–378.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Bowman D.M.J.S. Fire in the Earth system / D.M.J.S. Bowman, J. Balch, P. Artaxo [et al.] // *Science*. — 2009. — Vol. 324, № 5926. — P. 481–484.
2. Toth C. Remote sensing platforms and sensors: A survey / C. Toth, G. Józkóv // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. — 2016. — Vol. 115. — P. 22–36.
3. Khabarov D.A. Analiz sovremennyh tehnologij distancionnogo zondirovaniya Zemli [Analysis of modern technologies of remote sensing of the Earth] / D.A. Khabarov, A.V. Martynov, L.P. Petrova [et al.] // *Moskovskij jekonomicheskij zhurnal [Moscow Economic Journal]*. — 2019. — № 1. — P. 181–190. [in Russian]
4. LeCun Y. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // *Nature*. — 2015. — Vol. 521, № 7553. — P. 436–444.
5. Krizhevsky A. Imagenet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G.E. Hinton // *Advances in neural information processing systems*. — 2012. — Vol. 25.
6. Rodrigues M. Modeling the spatial variation of the explanatory factors of human-caused wildfires in Spain using geographically weighted logistic regression / M. Rodrigues, J. de la Riva, S. Fotheringham // *Applied Geography*. — 2014. — Vol. 48. — P. 52–63.
7. Castro R. Modeling Forest fire danger from geographic information systems / R. Castro, E. Chuvieco // *Geocarto International*. — 1998. — Vol. 13, № 1. — P. 15–23.
8. Sullivan A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models / A.L. Sullivan // *International Journal of Wildland Fire*. — 2009. — Vol. 18, № 4. — P. 369–386.

9. Viegas D.X. Slope and wind effects on fire propagation / D.X. Viegas // International Journal of Wildland Fire. — 2004. — Vol. 13, № 2. — P. 143–156.
10. Yen J.C. A new criterion for automatic multilevel thresholding / J.C. Yen, F.J. Chang, S. Chang // IEEE Transactions on Image Processing. — 1995. — Vol. 4, № 3. — P. 370–378.