

Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии имени В.Р. Филиппова. 2025. № 3 (80). С. 145-151.

Buryat Agrarian Journal. 2025;3(80):145–151.

Краткое сообщение

УДК 551.58: 004.8

doi: 10.34655/bgsha.2025.80.3.016

Разработка интеллектуальной модели прогнозирования лесных пожаров

Инга Сергеевна Евдокимова¹, Инна Степановна Тулохонова²

^{1,2} Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, Улан-Удэ, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследования по созданию модели прогнозирования возникновения лесных пожаров на основе метода машинного обучения «Случайный лес» и нейронной сети. В работе использованы архивные данные спутниковых снимков MODIS. Модель протестирована на сформированном наборе данных из 996 тысяч строк, содержащем основную информацию о координатах, дате, индексе растительности, температуре поверхности земли, скрытом тепловом потоке, индексе лиственного покрова, рельефе, валовой первичной производительности. Разработанный сервис по визуализации карт спрогнозированных мест возгораний позволяет оперативно идентифицировать потенциально опасные территории и предоставлять помощь службам экстренного реагирования и спасательным подразделениям. Экспериментальные данные, полученные разработанным прототипом программного обеспечения, позволили сделать вывод, что модель будет способствовать повышению точности прогнозирования зон повышенного риска возгорания лесов и улучшению планирования противопожарных мероприятий по оптимальному размещению сил и средств пожаротушения, направленных на повышение уровня безопасности территорий и обеспечение своевременного информирования соответствующих структур о возможных угрозах.

Ключевые слова: машинное обучение, случайный лес, нейронная сеть, карта возгораний, прогнозирование, точка возгорания, программное обеспечение, лесные пожары, экосистема.

Brief report

Development of an intelligent forest fires forecasting model

Inga S. Evdokimova¹, Inna S. Tulokhonova²

^{1,2} East Siberian State University of Technology and Management, Ulan-Ude, Russia

Abstract. The article presents the results of a study on creating a model for predicting the occurrence of forest fires based on the «Random Forest» machine learning method and a neural network. Archived data from MODIS satellite images was used during the research work. The model was tested on a generated dataset of 996,000 rows containing basic information about coordinates, dates, vegetation index, ground surface temperature, latent currents, foliage index, relief, and gross primary productivity. The developed service for visualizing maps of predicted fire sites allows you to quickly identify potentially dangerous areas and provide assistance to emergency response services and rescue units. The experimental data, obtained thanks to the developed

prototype of software allows to make a conclusion that the model will help improve the accuracy of forecasting areas of increased risk of forest fires and better the planning of fire-fighting measures for the optimal deployment of firefighting forces and equipment aimed at increasing the level of security of territories and ensuring timely information to relevant structures about possible threats.

Keywords: machine learning, random forest, neural network, fire map, forecasting, ignition point, software, forest fires, ecosystem.

Введение. В настоящее время лесные пожары стали одной из наиболее серьезных проблем, от которых страдают многие регионы страны. Они оказывают серьезное воздействие на экосистемы, приносят значительные экономические потери, включая уничтожение лесных ресурсов, сельскохозяйственных угодий и инфраструктуры, а также ущерб туристическому бизнесу и другим отраслям экономики, представляют угрозу жизни и здоровью людей, особенно в прилегающих к лесам населенным пунктам.

В соответствии с этим, одной из важнейших задач для сокращения количества лесных пожаров является прогнозирование возгораний, которое дает возможность предотвращения возникновения новых пожаров. Одним из возможных решений данной задачи может стать использование машинного обучения и нейронных сетей, которые на основе прошлых данных о возгораниях смогут по схожим условиям предсказывать новые пожары [1, 2, 3].

Пуртаги З., Пургасеми Х., Аретано Р., Семераро Т. и др. [4] в своем исследовании выявили общие показатели, влияющие на лесные пожары, и провели сравнение карт подверженности лесным пожарам, основанных на расширенном дереве регрессии, обобщенной аддитивной модели и моделях интеллектуального анализа данных случайного леса. Места лесных пожаров были определены с использованием изображений MODIS, исторических записей и тщательной проверки на местах.

В статье Yudong Li, Zhongke Feng, Shilin Chen et al. [5], основываясь на данные спутникового мониторинга горячих точек провинции Гуанси за период восемь-десять лет, на основе данных метеорологии, рельефа, растительности, инфраструктуре и социально-экономических

данных определили основные факторы, вызывающие лесные пожары в провинции. Для построения моделей прогнозирования лесных пожаров авторами были использованы нейронные сети выбора признаков и обратного распространения.

Таким образом, наиболее объективную информацию о возможном возникновении лесного пожара можно получить путем интеграции различных источников данных и технологий мониторинга. Наряду с космическим мониторингом и наземной сетью наблюдений, дистанционное зондирование позволяет оперативно получать визуальную и тепловизионную информацию о лесных массивах и выявлять очаги возгорания. Технологии обработки данных, в частности, наряду с географическими информационными системами, машинное обучение и искусственные нейронные сети позволяют анализировать большие объемы спутниковых снимков для выявления закономерностей, ведущих к возникновению пожаров [6, 7].

В этой связи **целью** является развитие методов машинного обучения для прогнозирования лесных пожаров, способствующих повышению уровня безопасности и устойчивости лесной экосистемы [8, 9].

Объекты и методы. Для решения задачи прогнозирования принято использовать алгоритм машинного обучения «Случайный лес» и полносвязную нейронную сеть [10, 11, 12].

Алгоритм обучения нейронной сети использует методы для обеспечения стабильности обучения и предотвращения ситуаций, когда модель «застревает» в локальных минимумах или максимумах функции ошибки.

Алгоритм машинного обучения выбирает классификации, набравшие наибольшее количество голосов среди всех де-

ревью на основе оценки важности и выбирает среднее значение разницы из выходных данных разных деревьев.

В работе 70% исходных данных ис-

пользуются для обучения модели случайного леса, а оставшиеся 30% (out-of-bag samples, OOB) – для проверки модели.

Оценка важности переменной:

$$VI(X^j) = \frac{1}{ntree} * \sum_t (err' OOB_t^j - err OOB_t^j), \quad (1)$$

где X^j – j -я переменная, $ntree$ – количество деревьев, $err OOB_t^j$ – ошибка OOB каждого дерева t , $err' OOB_t^j$ – ошибка OOB, когда X^j переставляется, в то время как все остальные переменные остаются неизменными в данных готовых образцов. Для регрессии ошибка OOB – это среднеквадратичная ошибка. Для классификации OOB – это вероятность неверной классификации в данной постановке задачи.

Пусть имеется $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ – множество входных параметров системы:

$X_1 = \{x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}\}$ – множество значений координат возгораний;

$X_2 = \{x_{21}, x_{22}, \dots, x_{2n}\}$ – множество значений температуры °C;

$X_3 = \{x_{31}, x_{32}, \dots, x_{3n}\}$ – множество значений высот от уровня моря;

$X_4 = \{x_{41}, x_{42}, \dots, x_{4n}\}$ – множество значений индекса растительности для каждого участка возгорания;

$V = \{v_1, v_2\}$ – вектор воздействий внешней среды;

v_1 – недоступность вычислительных ресурсов;

v_2 – отмена расчета.

Необходимо определить: $Y = \{y_j\}$ – множество выходных сигналов;

y_i – спрогнозированные значения воз-

никновения пожара при ограничениях:

$$\delta = \begin{cases} y_i \leq 1 \\ y_i \geq 0 \end{cases}, \quad (2)$$

где δ – нормализованное значение x_i , x_i – нормализованное значение.

y_i – нормализованное значение.

Далее следует этап обучения модели с использованием нормализованных значений показателей.

Разработанный программный прототип является модульным. Каждый модуль выполняет определённую функцию или набор функций и может быть протестирован и изменен отдельно от других модулей. Модули могут быть использованы повторно в разных частях программы, что уменьшает дублирование кода и упрощает разработку/доработку. Структура модели представлена на рисунке 1.



Рисунок 1. Структура программного прототипа

Для обучения модели прогнозирования использованы архивные данные спутниковых снимков MODIS [13,14,15]. На основе сканирования земной поверхности в определенное время можно выявить тепловые аномалии, зафиксировать

скрытый тепловой поток, индекс растительности, валовую первичную производительность, температуру поверхности земли и площадь листового покрова (рис. 2).

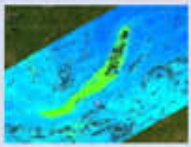
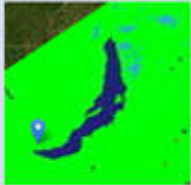
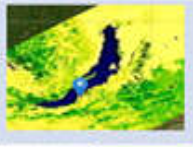
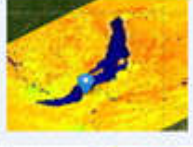
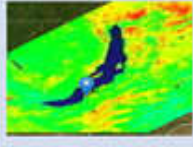
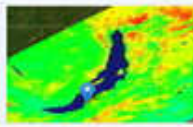
№	Данные MODIS для создания набора данных	Картографические файлы
1	MOD11A2 – температура поверхности земли	
2	MOD13A2 – индекс растительности (NDVI)	
3	MOD14A2 – пожары и тепловые аномалии	
4	MOD15A2 – индекс листового покрова и фотосинтетически активного излучения	
5	MOD16A2 – скрытый тепловой поток от поверхности земли к атмосфере	
6	MOD17A2 – валовая первичная продуктивность	
7	Данные USGS EROS о рельефе – GTOPO30	

Рисунок 2. Создание набора данных для обучения модели

Предобработка данных представлена четырьмя этапами: парсинг страниц архива USGS, скачивание файлов, извлечение

и нормализация данных, объединение извлеченных данных в одну csv таблицу (рис. 3).



Рисунок 3. Предобработка данных для обучения модели

Результаты и обсуждение. На текущем этапе исследований разработана интеллектуальная модель прогнозирования возникновения лесных пожаров на основе метода машинного обучения «Случайный лес» и нейронной сети. Модель протестирована на сформированном наборе данных из 996 тысяч строк, содер-

жащих информацию о координатах, дате, индексе растительности, температуре, скрытом тепловом потоке, индексе листового покрова, рельефе, валовой первичной производительности.

Экспериментальные данные, полученные в результате машинного обучения, демонстрируют эффективность модели (рис. 4).

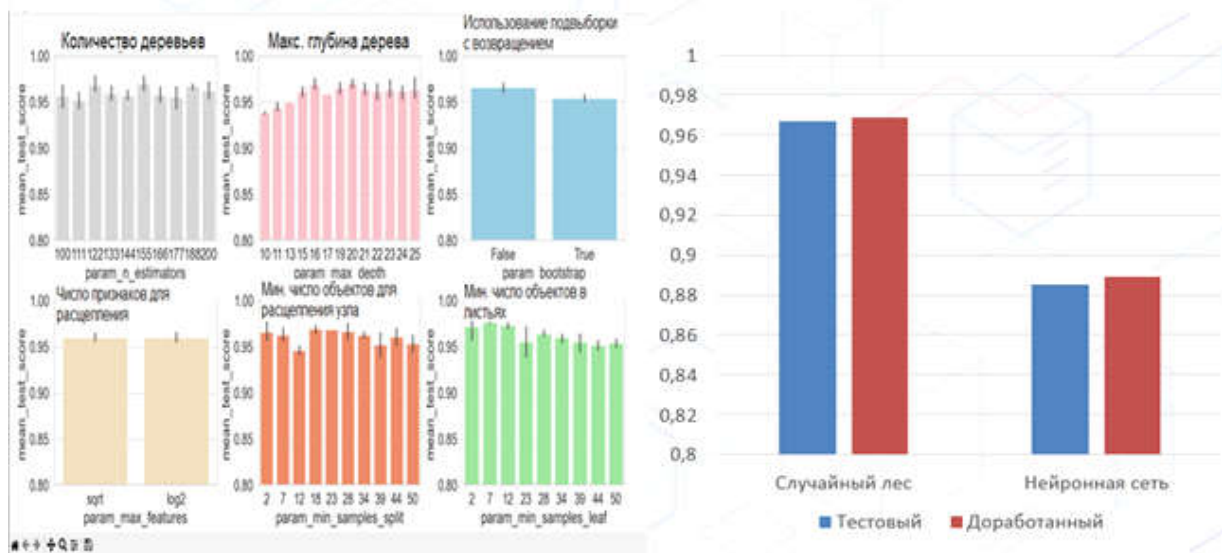


Рисунок 4. Точность моделей с различными значениями гиперпараметров

Также разработан сервис по визуализации карт спрогнозированных мест возгораний. В тех точках, где спрогнозиро-

но наличие возгорания, программа поверх карты рельефа выводит красную точку (рис. 5).

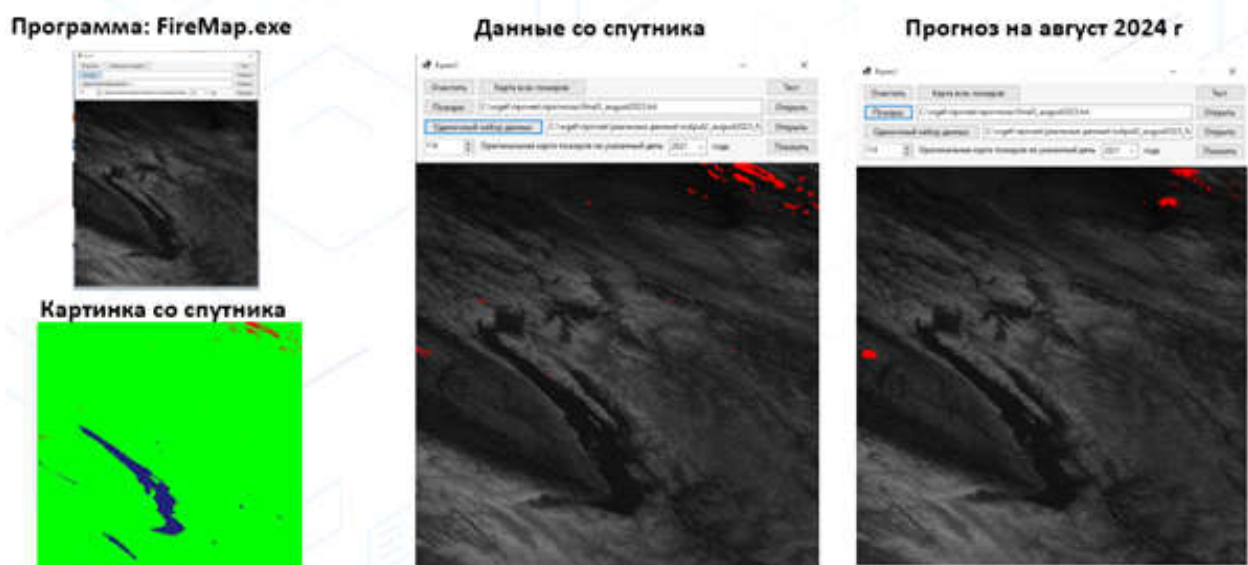


Рисунок 5. Визуализация прогноза

Модель на основе случайного леса продемонстрировала лучшие результаты по большинству показателей, особенно в случаях сложных зависимостей между признаками. Искусственная нейронная сеть также показала хорошие результаты, однако потребовала больше вычислительных ресурсов и времени обучения.

Заключение. Разработанные модели обеспечивают достаточно надежный

инструмент для прогнозирования вероятности возникновения лесных пожаров. Использование алгоритма случайного леса позволило достичь высокой точности и устойчивости модели. Предложенный подход может быть применен в системах мониторинга и предупреждения лесных пожаров, обеспечивая своевременное реагирование и снижение ущерба.

Список источников

1. Бабёнышев С.В., Матеров Е.Н., Миловидова Т.А. Ретроспективный анализ лесных пожаров в Красноярском крае с использованием науки о данных и методов машинного обучения // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2023. № 4 (31). С. 148-159. doi: 10.34987/vestnik.sibpsa.2023.81.32.016. EDN: JVZLYQ
2. Станкевич Т.С. Моделирование распространения лесного пожара при нестационарности и неопределенности посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2019. № 3. С. 97-107. doi: 10.24143/2072-9502-2019-3-97-107. EDN: QWWTIX
3. Козак Л.Я., Козак Я.М. Предсказания изменений экосистемы посредством искусственного интеллекта // Перспективные информационно-образовательные технологии: материалы V Международной научно-практической конференции в комбинированном формате. Тирасполь, 2024. С. 25-29. EDN: XWCSVA
4. Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R., Aretano R., Semeraro T. Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques // Ecological Indicators. 2016 Vol. 64, P. 72-84. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.ecolind.2015.12.030?ysclid=maywjxi4w1573595775> (дата обращения 12.05.2025).
5. Yudong Li, Zhongke Feng, Shilin Chen, Ziyu Zhao and Fengge Wang. Application of the Artificial Neural Network and Support Vector Machines in Forest Fire Prediction in the Guangxi Autonomous Region, China // Discrete Dynamics in Nature and Society. Vol. 2020, Article ID 5612650, 14 p. doi:10.1155/2020/5612650
6. Филипенко В.А., Зотов А.В. Прогнозирование площади горения лесного пожара с помощью машинного обучения // Безопасность техногенных и природных систем. 2019. № 3. С. 17-22. doi: 10.23947/2541-9129-2019-3-17-22. EDN: NFUTZX
7. Янец П.К., Гадаль С.Ж., Иванова С.А. Моделирование риска лесных пожаров в Республике Саха (Якутия) методами ГИС // Успехи современного естествознания. 2019. №11. С. 37-42. EDN: ICDDJT
8. Тулохонова И.С., Титов В.А. Нейросетевая модель углеродного баланса наземной экосистемы // Проблемы механики современных машин: сборник статей. 2022. С. 633-639. doi: 10.53980/9785907599055_633. EDN: BHNXY
9. Тулохонова И.С., Евдокимова И.С., Григоренко А.Г. Neural network model for detection of changes in forest environment using multispectral images // E3S Web of Conferences, XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education 2023, 431,05008. doi: 10.1051/e3sconf/202343105008. EDN: BZGJZX
10. Петросов Д.А. Моделирование алгоритма машинного обучения “Случайный лес” математическим аппаратом теории сетей Петри // Инженерный вестник Дона. 2024. № 10 (118). С. 193-204. EDN: PBBLYE
11. Безрукова Д.Е., Катаева Е.С. Применение методов машинного обучения для прогнозирования площадей лесных пожаров в Португалии // Интеллектуальные информационные системы: теория и практика. 2022. С. 62-70. EDN: RLYGYG
12. Суворов А.Н. Исследование методов искусственного интеллекта при прогнозировании лесных пожаров // Развитие науки, образования и технологий: механизм отбора и реализация приоритетов. 2023. С. 121-126. EDN: THEDNJ
13. Им С.Т. Влияние климата на леса Хакасии по данным съемки TERRA/MODIS // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2024. С. 184-188. EDN: QDSUFA
14. Мамаш Е.А., Пестунов И.А., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Валидация температурных продуктов MODIS/(TERRA+AQUA) LST с использованием наземных данных // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2022. С. 113-117. EDN: CWTSLR
15. Мартын И.А., Степанов С.Ю., Ключина Э.С. Мониторинг лесных пожаров и их последствий с использованием данных спектрорадиометра MODIS // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. 2024. № 3 (51). С. 118-126. EDN: VMSWFK

References

1. Babenyshev S.V., Materov E.N., Milovidova T.A. A retrospective analysis of forest fires in the Krasnoyarsk Territory using data science and machine learning methods. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2023;4(31):148-159 (In Russ.).
2. Stankevich T.S. Modeling the spread of forest fire in conditions of instability and uncertainty through artificial intelligence and deep machine learning. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Engineering and Computer Science*. 2019;3: 97-107 (In Russ.).
3. Kozak L.Ya., Kozak Ya.M. Predictions of ecosystem changes through artificial intelligence. *Promising information and educational technologies*. Proc. of the V Int. Sci. and Pract. Conf. in a combined format. Tiraspol, 2024. Pp. 25-29 (In Russ.).
4. Pourtaghi Z.S., Pourghasemi H.R., Aretano R., Semeraro T. Investigation of general indicators influencing on forest fire and its susceptibility modeling using different data mining techniques. *Ecological Indicators*.

2016; Vol.64:72-84. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1016/j.ecolind.2015.12.030?ysclid=maywjxi4wl573595775> (date of request 12.05.2025).

5. Yudong Li, Zhongke Feng, Shilin Chen, Ziyu Zhao. Application of an artificial neural network and the support vector method for predicting forest fires in the Guangxi Autonomous Region, China. *Discrete dynamics in nature and society*. 2020: Article ID 5612650, 14 p. doi:10.1155/2020/5612650 (date of request 12.05.2025).

6. Filipenko V.A., Zotov A.V. Forecasting the gorenje area of a forest fire using machine learning. *Safety of man-made and natural systems*. 2019;3:17-22 (In Russ.). doi: 10.23947/2541-9129-2019-3-17-22.

7. Yanets P.K., Gadal S.Zh., Ivanova S.A. Modeling the risk of forest fires in the Republic of Sakha (Yakutia) using GIS methods. *The successes of modern natural science*. 2019;11:37-42 (In Russ.).

8. Tulokhonova I.S., Titov V.A. Neural network model of carbon balance of terrestrial ecosystem. *Problems of mechanics of modern machines: collection of articles*. 2022. Pp. 633-639 (In Russ.).

9. Tulokhonova I.S., Evdokimova I.S., Grigorenko A.G. Neural network model for detection of changes in forest environment using multispectral images. *E3S Web of Conferences, XI International Scientific and Practical Conference Innovative Technologies in Environmental Science and Education*. 2023, 431.05008.

10. Petrosov D.A. Modeling of the Random Forest machine learning algorithm using the mathematical apparatus of Petri net theory. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024;10(118):193-204 (In Russ.).

11. Bezrukova D.E., Kataeva E.S. Application of machine learning methods for forecasting forest fire areas in Portugal. *Intelligent information systems: Theory and Practice*. 2022. Pp. 62-70 (In Russ.).

12. Suvorov A.N. Research of artificial intelligence methods in predicting forest fires. *Development of science, education and technology: selection mechanism and implementation of priorities*. 2023. Pp. 121-126 (In Russ.).

13. Im S.T. Climate impact on forests of Khakassia according to TERRA/MODIS survey data. *Regional problems of remote sensing of the Earth*. 2024. Pp. 184-188 (In Russ.).

14. Mamash E.A., Pestunov I.A., Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S. Validation of MODIS temperature products/(TERRA+AQUA) LST using ground data. *Regional problems of remote sensing of the Earth*. 2022. Pp. 113-117 (In Russ.).

15. Martin I.A., Stepanov S.Yu., Klyushina, E.S. Monitoring of forest fires and their consequences using MODIS spectroradiometer data. *Information technologies and systems: management, economics, transport, law*. 2024;3(51):118-126 (In Russ.).

Информация об авторах

Инга Сергеевна Евдокимова – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Программная инженерия и искусственный интеллект», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, evdinga@gmail.com;

Инна Степановна Тулохонова – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Программная инженерия и искусственный интеллект», Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, istulokhonova@mail.ru.

Information about the authors

Inga S. Evdokimova – Candidate of Science, (Engineering), Head of the Chair of Software Engineering and Artificial Intelligence, East Siberian State University of Technology and Management, evdinga@gmail.com;

Inna S. Tulokhonova – Candidate of Science (Pedagogics), Associate Professor, Chair of Software Engineering and Artificial Intelligence, East Siberian State University of Technology and Management, istulokhonova@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 23.05.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 08.07.2025.

The article was submitted 23.05.2025; approved after reviewing 25.06.2025; accepted for publication 08.07.2025.