www.volsu.ru

DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.4.4

UDC 528.8:630*43
LBC 26.88

THE ROLE OF GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS IN FOREST FIRE MONITORING

Danil A. Ustinov

Volgograd State University, Volgograd, Russian Federation

Abstract. Forest fires are one of the most serious environmental and economic threats, the frequency and intensity of which are steadily increasing due to climate change and increasing anthropogenic pressure. This paper examines the role of geographic information systems (GIS) as a key tool for monitoring, forecasting, and decision support in forest fire suppression. The main sources of spatial data are analyzed, including satellite remote sensing, unmanned aerial vehicles, terrestrial sensor networks, and digital elevation models. Methods for integrating heterogeneous data into a single GIS environment are described, along with fire spread models and decision support systems for optimal resource allocation. Using the example of the remote monitoring information system of the Federal Forestry Agency, successful experience in GIS application in Russia is demonstrated. The advantages (data integration, spatial analysis, decision support) and limitations (dependence on input data quality, computational complexity, need for personnel training) of using GIS are highlighted. Promising development directions are reviewed: real-time data collection technologies, the integration of artificial intelligence methods for risk analysis and fire source detection, and the creation of digital twins of territories for dynamic modeling of fire spread scenarios. It is concluded that GIS is being transformed from an auxiliary cartographic tool into a central integration platform for all stages of forest fire management – from long-term risk assessment to post-fire analysis and ecosystem restoration.

Key words: geographic information systems (GIS), forest fires, monitoring, remote Earth sensing, fire spread models, geoecology.

Citation. Ustinov D.A. The Role of Geographic Information Systems in Forest Fire Monitoring. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2026, vol. 16, no. 4, pp. 44-52. DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.4.4

УДК 528.8:630*43
ББК 26.88

РОЛЬ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ В МОНИТОРИНГЕ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Данил Алексеевич Устинов

Волгоградский государственный университет, г. Волгоград, Российская Федерация

Аннотация. Лесные пожары представляют собой одну из наиболее серьезных экологических и экономических угроз, частота и интенсивность которых неуклонно возрастают в связи с изменением климата и ростом антропогенной нагрузки. В данной работе рассматривается роль геоинформационных систем (ГИС) как ключевого инструмента для мониторинга, прогнозирования и поддержки принятия решений при тушении лесных пожаров. Проанализированы основные источники пространственных данных, включая спутниковое дистанционное зондирование, беспилотные летательные аппараты, наземные сенсорные сети и цифровые модели рельефа. Описаны методы интеграции разнородных данных в единую ГИС-среду, а также модели распространения огня и системы поддержки принятия решений для оптимального распределения ресурсов. На примере информационной системы дистанционного мониторинга Рослесхоза (ИСДМ-Рослесхоз) продемонстрирован успешный опыт применения ГИС в России. Выделены преимущества (интеграция данных, пространственный анализ, поддержка решений) и ограничения (зависимость от качества исходных данных, вычислительная сложность, необходимость обучения персонала) использования ГИС. Рассмотрены

© Устинов Д.А., 2026

перспективные направления развития: технологии сбора данных в реальном времени, интеграция методов искусственного интеллекта для анализа рисков и обнаружения очагов возгорания, а также создание цифровых двойников территорий для динамического моделирования сценариев распространения огня. Сделан вывод о трансформации ГИС из вспомогательного картографического инструмента в центральную интеграционную платформу для всех этапов управления лесными пожарами – от долгосрочной оценки рисков до изучения последствия пожара и восстановления экосистем.

Ключевые слова: геоинформационные системы (ГИС), лесные пожары, мониторинг, дистанционное зондирование Земли, модели распространения огня, геоэкология.

Цитирование. Устинов Д. А. Роль геоинформационных систем в мониторинге лесных пожаров // Природные системы и ресурсы. – 2026. – Т. 16, № 4. – С. 44–52. – DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2026.4.4

Введение

Стихийные бедствия произрастают из совокупности различных факторов, состоящих из комплексных геофизических характеристик и деятельности человека. Один из вариантов возможной чрезвычайной ситуации – это пожары, различающиеся по типу: индустриальные, бытовые и природные. Лесные пожары представляют собой одну из наиболее серьезных экологических и экономических угроз для лесных экосистем России и мира в целом. Каждый год огнем уничтожаются огромное количество гектаров лесных массивов, что наносит колоссальный ущерб биоразнообразию и состоянию лесных экосистем России, что приводит к ухудшению качества воздуха и водных ресурсов, а также создает серьезную угрозу для населенных пунктов и инфраструктуры [4; 6; 10; 17; 20]. В последние десятилетия вследствие изменения климата, повышения частоты засух и роста антропогенной нагрузки на экосистемы – неуклонно выросла частота и интенсивность лесных пожаров, что делает проблему их оперативного обнаружения и тушения особенно актуальной.

Проблема лесных пожаров приобретает особую значимость для Российской Федерации, поскольку Россия обладает крупнейшими в мире лесными массивами, которые выполняют важнейшую планетарную функцию регуляции углеродного баланса и поддержания глобального климата [5]. Традиционные методы обнаружения и мониторинга лесных пожаров, такие как наземное патрулирование и авиационное наблюдение – располагают рядом существенных ограничений: высокая стоимость, ограниченная регулярность обзора местности, невозможность эффективного покрытия труднодоступных территорий, а также высокая степень риска для наблюдателей. В данных условиях возникает острая необходимость в разработке и внедрении продвинутых методов мониторинга, основанных на геоинформационных системах (ГИС).

Основной целью данной статьи является изучение действительной значимости роли геоинформационных систем в следующих аспектах: оценка опасности лесных пожаров, прогнозирование распространения пламени и возникновения возгорания, а также перспективы использования данных систем.

Структура геоинформационных систем. Геоинформационные системы (ГИС) – это системы, направленные на анализ, управление, хранение, изменение и сбор актуальных пространственных данных. ГИС технология включает в себя различные операции над базой данных с целью обработки данных. Основная задача ГИС – это возможность визуализации, анализ и интерпретации информации, чтобы понимать отношения, паттерны и динамику развития.

Любая геоинформационная система состоит из следующих компонентов: базы данных, аппаратного и программного обеспечения, методов и операторов. Базы данных ГИС содержат в себе классы пространственных объектов (наборы геоданных с одинаковым типом геометрии, такие как точки, линии и полигоны), атрибутивные таблицы (данные, привязанные к пространственными объектами, содержащая их характеристики) и растровые наборы данных (геопространственная информация, представленная в виде сетки ячеек, где каждая ячейка хранит определенное значение, такую как высота, температура или цвет). Аппаратное обеспечение представляет из себя компьютеры и сервера, содержащие программное обеспечение, которое уже в свою очередь представлено

приложениями с инструментами для работы с данными. Под методами подразумевают процедуры, шаблоны и техники работы для обработки и анализа пространственной информации и применения ГИС к решению конкретных проблем. Операторы – это профессионалы, способные управлять и анализировать информацию, предоставляя итоговую информацию по результату работы с геоинформационной системой.

Источники и типы пространственных данных для мониторинга лесных пожаров. Эффективность геоинформационных систем при мониторинге и поддержки принятия решений по тушению лесных пожаров напрямую зависит от качества, разнообразия и оперативности поступающих пространственных данных. Современные ГИС интегрируют информацию со спутниковых платформ, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), наземных сенсорных сетей и вспомогательных геопространственных наборов данных [1; 3; 7–9; 12; 13; 15; 18; 21; 23]. Спутниковое дистанционное зондирование остается наиболее распространенным источником данных для обнаружения и мониторинга лесных пожаров благодаря широкому охвату территории и регулярной повторяемости съемки [26].

Данные беспилотных летательных аппаратов. Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) представляют собой наиболее гибкий инструмент для оперативного получения данных высокой детальности. Они предоставляют пространственное разрешение вплоть до сантиметровых значений. БПЛА обладают тепловизорами, позволяющими получить достоверную информацию о периметрах площади, которое подверглось возгоранию и площади активного воспламенения [19].

Наземные сенсорные сети. Если спутниковые системы обеспечивают для наблюдения глобальный обзор на территорию, а беспилотные летательные аппараты обладают гибкостью оперативной съемки, то наземные беспроводные сенсорные сети (Wireless Sensor Networks) предоставляют принципиально иной тип данных: непрерывный, локальный и сверхоперативный. Эти сети играют ключевую роль в раннем обнаружении очагов возгораний и в мониторинге микроклиматических параметров в труднодоступных или особо охраняемых лесных массивах. Благодаря технологии беспроводных сенсорных сетей в сочетании с ГИС, можно обнаружить чрезвычайную ситуацию и точно определить расположение ее места возникновения, а также помогает выбирать наиболее эффективный подход к разрешению проблемы со всеми соответствующими пространственными данными. Кроме того, можно быстро определить расстояния от мест пожаров до аварийных дорог и проверить возможности для переброски транспортных средств и людей, а также потенциального воздушного вмешательства [28].

Цифровые модели рельефа и производные данные. Рельеф местности является особенно важным фактором, определяющим локальные особенности распространения лесного пожара. На основе цифровых моделей рельефа рассчитываются производные характеристики: уклоны (крутизна склона в градусах или процентах) и экспозиции (ориентация склона по сторонам света). Так к примеру, на больших высотах, как правило, снижается риск возникновения пожаров из-за повышенной влажности и количества осадков, в то время как на склонах, которые получают больше солнечного света и подвергаются воздействию ветра, риск возникновения возгорания выше. Данная информация в дальнейшем используется в математических моделях для моделирования движения огня, построении его маршрута [24].

Интеграция разнородных данных в ГИС. Основной задачей геоинформационной системы – это интеграция данных из вышеперечисленных источников в единую систему для мониторинга, с возможностью анализировать возможное появление, время, направление пожара, а также занимаемую им пространство. Вначале происходит процесс обнаружения пожара, который совершается в три этапа: загрузка и первичная обработка, анализ вновь обнаруженных пожаров (индексация), вспомогательные вычисления [16]. Однако обнаружение пожара – это лишь первый шаг. Для эффективного управления тушением критически важно предсказать, как будет распространяться огонь в ближайшие часы и сутки. Эту задачу решают физически обоснованные и эмпирические модели распространения лесных пожаров, интегрированные в ГИС-среду.

Модели распространения лесных пожаров и поддержка принятия решений.

Основные модели распространения огня. Из-за сложности пожара как физического процесса, на поведение которого влияет множество факторов, существует обильное количество моделей распространения огня. Их всех можно классифицировать на следующие несколько типов: теоретические, статистические (эмпирические) и полуэмпирические.

Теоретические модели создаются на основе фундаментальных законы тепломассопереноса, горения, газовой динамики и иных химических реакций. Примером данной модели является аэротермохимическая модель лесного пожара, разработанная А.М. Гришиным [1], в которой содержатся десятки различных уравнений, описывающих трехмерные процессы теплообмена и массообмена, химических превращений при горении и других явлений.

Эмпирические модели распространения берут за основу сбор и систематизацию статистических данных за прошлые пожары в определенном секторе, изучая их параметры: скорость ветра, вид растительности, влажность, сезон и иные факторы. Прогноз в таких моделях дается с определенной вероятностью, поскольку необходимо значительная доля схожести текущей ситуации с предыдущими.

Фундаментов для построения полуэмпирических моделей служит набор данных, которые получены при экспериментальных пожарах на участках определенной категории (например, какого-то типа леса). В результате устанавливается зависимость скорости и интенсивности горения от переменных факторов (ветра, уровня засухи и др.) в виде эмпирической формулы, которая и служит моделью. Одной из наиболее влиятельных моделей пожаров является полуэмпирическая модель распространения огня Дика Ротермела [27], опубликованная в 1972 году. Модель базируется на обобщении большого экспериментального материала. В модели учитываются направление и скорость ветра, уклон поверхности, а также свойства и состояние растительных горючих материалов. В основе своей, геоинформационные системы используют комплексные модели, которые объединяют несколько подходов в единую структуру, что позволяет всесторонне оценить ситуацию и рассмотреть сразу несколько возможных вариантов распространение лесного пожара.

Поддержка принятия решений при тушении. После того как пожар обнаружен и построен прогноз его распространения, возникает ключевая оперативная задача: как наиболее эффективно использовать ограниченные ресурсы (люди, техника, вода, самолеты-танкеры) для минимизации ущерба. ГИС предоставляет здесь набор аналитических инструментов, объединяемых понятием «система поддержки принятия решений». Для этого в системе распределяется «вес» между различными решениями, в зависимости от различных факторов, такими как транспортная доступность [25]. После чего, руководитель процесса тушения пожара, может выбрать оптимальное решение на основе приведенного «веса» различных решений. Помимо этого, дополнительная информация на карте в виде транспортных путей, населенных пунктов, пожароопасных и взрывоопасных объектов – позволяет командам пожаротушения построить верную стратегию тушения и обеспечить вовремя эвакуацию гражданского населения.

Практика и перспективы применения ГИС. Примером активно используемой геоинформационной системы для борьбы с лесными пожарами является информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз). Данная система создавалась, начиная с 1995 г., в рамках различных проектов. По заказу Рослесхоза в 2003 г. были проведены работы по унификации элементов ИСДМ-Рослесхоз, и в конце пожароопасного сезона она была введена в опытную эксплуатацию. В 2004 г. проводилась опытная эксплуатации и доработка элементов системы. В 2005 г. был разработан и утвержден первый регламент работы системы, и она была введена в промышленную эксплуатацию [2; 11]. При этом, несмотря на эксплуатацию систему, все еще продолжается активное развитие данной ГИС, дополняя и расширяя проект. При этом, ИСДМ-Рослесхоз активно привлекает внимания со стороны научного сообщества, с целью поиска новых подходов в решении поставленных задач, вместо разработки новых систем с нуля [14].

Преимущества и ограничения при использовании ГИС. Геоинформационные системы стали неотъемлемой частью монито-

ринга лесных пожаров. ГИС создает возможности для предотвращения катастроф, прогнозирования распространения фронта огня, а также ретроспективного анализа произошедшего пожара, чтобы найти причины и изучить совершенные ошибки. Однако, как и любые другие инструменты, данные системы имеют свои ограничения. Так, правильность работы ГИС строится вокруг качества изначальных данных. Точность анализа напрямую определяется разрешением и частотой обновления данных. Спутники низкого разрешения могут пропускать небольшие очаги (<100 м²), а снимки высокого разрешения (доступны лишь раз в несколько дней и могут быть скрыты облачностью. Также подобные программы требуют своего процесса обучения в пользовании ими, при этом время между получением информации, анализом и предоставлением результата может привести к задержкам в условиях быстро развивающегося пожара.

Перспективы развития ГИС. Дальнейшее развитие геоинформационных систем для мониторинга лесных пожаров определяется несколькими взаимосвязанными направлениями: интеграцией потоков данных в реальном времени, использование искусственного интеллекта для анализирования информации, создание цифровых двойников территорий для моделирования сценариев развития пожаров и поддержки принятия решений.

Технологии данных в реальном времени. Одним из ключевых направлений развития является сокращение задержки между сбором данных и их отображением в ГИС до минут и даже секунд. Это достигается за счет двух групп технологий: спутниковая телеметрия низкой задержки и интеграция с системами телеметрии персонала и техники. Примером спутников, которые способны отображать данные в приближенным к реальному времени является Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) – американские спутники, обеспечивающих прогнозирование погоды, отслеживание штормов и метеорологические исследования. С каждым новым запуском спутники улучшались и модифицировались с целью ускорения и более детального получения информация с орбиты.

Использование искусственного интеллекта для анализа. Интеграция методов искусственного интеллекта (ИИ) с геоинформационными системами представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся направлений в области лесопожарного мониторинга. Количество научных публикаций на стыке ИИ и мониторинга лесных пожаров значительно выросло в последнем десятилетии, причем заметный рост начался после 2016 г. [29], что связано с развитием «глубокого обучения» (совокупности методов обучения, основанных на обучении представлениям) и доступностью дистанционного зондирования высокого разрешения, что соответствует опасениям по поводу растущего воздействия лесных пожаров. Использование ИИ для мониторинга лесных пожаров с использованием ГИС можно рассматривать в контексте следующих категорий: риск и уязвимость к пламени, поведение человека и поддержка принятия решений, растительность и топливо, обнаружение очагов возгорания и мониторинг, а также поведение и распространение огня.

Цифровые двойники. Наиболее комплексным направлением развития ГИС для лесопожарного мониторинга является создание цифровых двойников (цифровая копия физического объекта) территорий – динамических виртуальных копий физической среды, которые непрерывно синхронизируются с реальным миром через потоки данных и позволяют моделировать, прогнозировать и оптимизировать решения по борьбе с стихийными бедствиями. Цифровой двойник для управления лесными пожарами интегрирует данные дистанционного зондирования, метеопрогнозы, наземные сенсоры, данные о рельефе и растительности в единую интерактивную платформу. Более того, использование цифрового двойника в геоинформационных системах предоставит всестороннее понимание пространственного контекста, позволяющее проводить динамические симуляции, прогнозный анализ и мониторинг в режиме реального времени [22].

Таким образом, развитие ГИС для лесопожарного мониторинга движется в направлении создания динамичных систем, способных быстро адаптироваться, прогнозировать и строить стратегию по тушению пожаров еще до момента или во время возникновения. Ключевыми вызовами остаются: обеспечение непрерывности потоков спутниковых данных,

снижение вычислительной сложности моделей для их оперативного применения. Успешное преодоление этих вызовов позволит перейти от реактивного управления пожарами к проактивному, основанному на прогнозном моделировании и автоматизированной поддержке решений.

Заключение

Проведенный в данной статье анализ позволяет сформулировать ряд выводов, касающихся роли геоинформационных систем в борьбе с лесными пожарами – от оценки опасности до прогнозирования распространения пламени и перспектив развития этих технологий. На сегодняшний день ГИС обеспечивает важный анализ пространственных данных, определяющих вероятность возникновения лесного пожара и его интенсивность распространения. ГИС преобразилась из вспомогательного картографического инструмента в центральную интеграционную платформу, связующим звеном между разрозненными данными и управленческими решениями на всех стадиях – от долгосрочной оценки рисков и профилактики до оперативного обнаружения, прогнозирования распространения и координации тушения, а также оценки последствий и восстановления территорий лесных массивов. Вместе с тем технология активно развивается, а перспективы лежат в ускорении актуализации данных, продолжении интеграции искусственного интеллекта в системы, а также создании динамических виртуальных копий физической среды, что позволит существенно снизить ущерб от лесных пожаров и повысить безопасность населения и экосистем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аль-Чаабави, М. Р. А. Геоинформационный анализ состояния сельскохозяйственных земель на юге Ирака / М. Р. А. Аль-Чаабави, Е. А. Иванцова, В. Г. Юферев // Природные системы и ресурсы. – 2022. – Т. 12, № 1. – С. 38–44. – DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.1.5

2. Гришин, А. М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения / А. М. Гришин // Физика горения и взрыва. – 1996. – Т. 32, № 5. – С. 35–54.

3. Дистанционные исследования и картографирование состояния антропогенно-трансформированных территорий юга России / В. В. Новочадов [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 1 (3). – С. 151–158.

4. Егорова, Е. В. Причины и экосоциальные последствия ландшафтных пожаров 2010–2012 гг. на территории Российской Федерации / Е. В. Егорова, Е. А. Иванцова / Социально-экономическое формирование и функционирование территорий Северного Прикаспия : сб. тр. конф. – М. : Вестник РАСХН, 2013. – С. 148–151.

5. Иванцова, Е. А. Агроэкологическое значение защитных лесных насаждений в Нижнем Поволжье / Е. А. Иванцова // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 11, Естественные науки. – 2014. – № 4 (10). – С. 40–47.

6. Иванцова, Е. А. Аридные экосистемы в условиях техногенного прессинга / Е. А. Иванцова, В. В. Новочадов, Н. В. Онистратенко // Академический вестник ELPIT. – 2018. – Т. 3, № 4 (6). – С. 22–28.

7. Иванцова, Е. А. Геоинформационный анализ и оценка современного состояния орошаемых земель территории Сарпинской низменности / Е. А. Иванцова, И. А. Комарова // Известия Нижневолжского агроуниверсистетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 2 (74). – С. 60–67.

8. Иванцова, Е. А. Геоинформационный анализ состояния и агролесомелиоративного обустройства сельскохозяйственных ландшафтов южной части Тигра и Евфрата / Е. А. Иванцова, М. Р. А. Аль-Чаабави. – Волгоград, 2023. – 108 с.

9. Иванцова, Е. А. Использование геоинформационных технологий и космических снимков для анализа агроландшафтов / Е. А. Иванцова, И. А. Комарова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 2 (62). – С. 357–366.

10. Иванцова, Е. А. Основные направления и проблемы обеспечения экологической безопасности региона / Е. А. Иванцова // Научно-производственное обеспечение социально-экономической и экологической деятельности в АПК : материалы Междунар. науч.-практ. конф. – М.: Вестник РАСХН, 2014. – С. 25–28.

11. Информационная система дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства РФ (состояние и перспективы развития) / С. А. Барталев [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 2, № 5. – С. 419–429.

12. Комарова, И. А. Геоинформационная оценка агроландшафтов на тестовом полигоне «Черные Земли» / И. А. Комарова, Е. А. Иванцова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2021. – № 1. – С. 452–460.

13. Комарова, И. А. Лесомелиоративная оценка агроландшафтов Сарпинской низменности по данным дистанционного зондирования / И. А. Комарова, Е. А. Иванцова // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 9. – С. 7–12.

14. Научное обоснование методики автоматизированного управления силами и средствами пожаротушения / Н. А. Коршунов [и др.] // Лесной вестник. – 2022. – Т. 26, № 3. – С. 75–84.

15. Овсянкин, Р. В. Компьютерное картографирование сохранности зеленых насаждений в городских ландшафтах / Р. В. Овсянкин, Е. А. Иванцова // Известия Нижневолжского агроуниверсистетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2016. – № 2 (42). – С. 134–140.

16. Павличенко, Е. А. Использование геоинформационных систем при анализе и прогнозе природных чрезвычайных ситуаций на примере мониторинга лесных пожаров / Е. А. Павличенко, В. В. Иванов, С. И. Миськив // Технологии гражданской безопасности. – 2004. – № 4. – С. 46–51.

17. Пожары как фактор утраты биоразнообразия и функций лесных экосистем / А. П. Гераськина [и др.] // Вопросы лесной науки. – 2021. – Т. 4, № 2. – С. 1–76.

18. Ряснов, В. А. Применение метода дешифрирования космоснимков при оценке состояния лесных ценозов Волго-Ахтубинской поймы / В. А. Ряснов, Е. А. Иванцова // Экологическая безопасность и охрана окружающей среды в регионах России: теория и практика : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Волгоград, 2015. – С. 204–209.

19. Середа, Э. А. Применение беспилотных авиационных систем при тушении лесных пожаров / Э. А. Середа, С. Г. Аксенов // Экономика строительства. – 2023. – № 8. – С. 34–37.

20. Снижение негативного воздействия на агроценозы путем управления примыкающими природно-антропогенными системами / Е. А. Иванцова [и др.] // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология. – 2017. – Т. 19, № 4 (41). – С. 138–146.

21. Экобиотехнологии оптимизации аридных фитоценозов юго-востока европейской части России / Е. А. Иванцова [и др.]. – Волгоград, 2019. – 76 с.

22. Digital Twins for Geospatial Decision-Making / Sajith Ranatunga [et al.] // ISPRS TC IV Mid-term Symposium “Spatial Information to Empower the Metaverse”: ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Fremantle, 2024. – Vol. X-4-2024. – P. 271–278.

23. Environmental Evaluation of the System of Protective Forest Plantations in Urban Landscapes Volgograd Agglomeration Using Gis-Technologies / E. A. Ivantsova [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Current Problems and Solutions. – 2019. – P. 012036.

24. Ersoy, İ. A Multi-Criteria Forest Fire Danger Assessment System on GIS Using Literature-Based Model and Analytical Hierarchy Process Model for Mediterranean Coast of Manavgat, Türkiye / İ. Ersoy, E. Unsal, O. Gürsoy // Sustainability. – 2025. – Vol. 17, no. 5. – P. 1–27.

25. Multi-Objective Spatial Optimization of Forest Fire Monitoring Networks: An Integrated GIS-MCDM Framework Enhanced by Improved Genetic Algorithms / Lijing Wang [et al.] // PLoS One. – 2025. – Vol. 20. – P. 1–26. – DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0338090

26. Nelson, D. M. Trends and Applications in Wildfire Burned Area Mapping: Remote Sensing Data, Cloud Geoprocessing Platforms, and Emerging Algorithms / D. M. Nelson, Yu. He, G.W.K. Moore // Geomatica. – 2024. – № 76, iss. 1. – P. 1–17.

27. Rothermel, R. C. A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels / R. C. Rothermel. – Ogden : USDA, Forest Service Research Paper, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972. – 40 p.

28. Salam, M. A. Integration of Wireless Sensor Networks in Geographical Information Systems: A Survey / M. A. Salam, O. M. Soysal, H. Schneider // MSV. – 2010. – P. 307–314.

29. Silva, D. Artificial Intelligence in Wildland–Urban Interface Wildfire Management: A Twophase Review Combining Bibliometric Mapping and Thematic Analysis / D. Silva, T. M. Ferreira, H. Rodrigues // Natural Hazards. – 2026. – № 122. – P. 1–30.

REFERENCES

1. Al-Chaabavi M.R.A., Ivantsova E.A., Uferev V.G. Geoinformatsionnyy analiz sostoyaniya selskokhozyaystvennykh zemel na yuge Iraka [Geoinformation Analysis of the State of Agricultural Land in Southern Iraq]. *Prirodnye sistemy i resursy* [Natural Systems and Resources], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 38-44. DOI: https://doi.org/10.15688/nsr.jvolsu.2022.1.5

2. Grishin A.M. Obshchaya matematicheskaya model lesnykh pozharov i yeye prilozheniya [General Mathematical Model for Forest Fires and Its Applications]. *Fizika goreniia i vzryva* [Physics of Combustion and Explosion], 1996, vol. 32, no. 5, pp. 35-54.

3. Novochadov V.V., Rulev A.S., Uferev V.G., Ivantsova E.A. Distantsionnyye issledovaniya i kartografirovaniye sostoyaniya antropogenno-transformirovannykh territoriy yuga Rossii [Remote Studies and Mapping of the State of Anthropogenic-Transformed Territories of the South of Russia]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye* [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], 2019, no. 1 (3), pp. 151-158.

4. Egorova E.V., Ivantsova E.A. Prichiny i ekosotsialnyye posledstviya landshaftnykh pozharov 2010–2012 gg. na territorii Rossiyskoy Federatsii [The Causes and Ecosocial Consequences of Landscape Fires in the Russian Federation Between 2010 and 2012]. *Sotsialno-ekonomicheskoye formirovaniye i funktsionirovaniye territoriy Severnogo Prikaspiya: sb. tr. konf.* [Socioeconomic Formation and Functioning of the Territories of the Northern Caspian Region. Collection of Conference Papers]. Moscow, Vestnik RASKhN Publ., 2013, pp. 148-151.

5. Ivantsova E.A. Agroekologicheskoye znacheniye zashchitnykh lesnykh nasazhdeniy v Nizhnem Povolzhye [Agroecological Importance of the Protective Forest Plantings in Lower Volga Region]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarsvennogo universiteta. Seriya 11. Estestvennye nauki* [Science Journal of Volgograd State University. Natural Sciences], 2014, no. 4 (10), pp. 40-47.

6. Ivantsova E.A., Novochadov V.V., Onistratenko N.V. Aridnyye ekosistemy v usloviyakh tekhnogennogo pressinga [Arid Ecosystems Under Technogenic Pressure]. *Akademicheskiy vestnik ELPIT*, 2018, vol. 3, no. 4 (6), pp. 22-28.

7. Ivantsova E.A., Komarova I.A. Geoinformatsionnyy analiz i otsenka sovremennogo sostoyaniya oroshayemykh zemel territorii Sarpinskoy nizmennosti [Geoinformation Analysis and Assessment of the Current State of Irrigated Lands in the Sarpinskaya Lowland]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversistetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye* [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], 2024, no. 2 (74), pp. 60-67.

8. Ivantsova E.A., Al-Chaabavi M.R.A. *Geoinformatsionnyy analiz sostoyaniya i agrolesomelioprativnogo obustroystva selskokhozyaystvennykh landshaftov yuzhnoy chasti Tigra i Yevfrata* [Geoinformation Analysis of the State and Agroforestry Development of Agricultural Landscapes in the Southern Part of the Tigris and Euphrates]. Volgograd, 2023. 108 p.

9. Ivantsova E.A., Komarova I.A. Ispolzovaniye geoinformatsionnykh tekhnologiy i kosmicheskikh snimkov dlya analiza agrolandshaftov [The Use of Geoinformation Technologies and Satellite Images for the Analysis of Agricultural Landscapes]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professionalnoe obrazovanie* [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], 2021, no. 2 (62), pp. 357-366.

10. Ivantsova E.A. Osnovnyye napravleniya i problemy obespecheniya ekologicheskoy bezopasnosti regiona [Main Directions and Problems of Ensuring Environmental Safety in the Region]. *Nauchno-proizvodstvennoye obespecheniye sotsialno-ekonomicheskoy i ekologicheskoy deyatelnosti v APK : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Scientific and Industrial Support for Socio-Economic and Environmental Activities in the Agro-Industrial Complex. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Moscow, Vestnik RasKhN, 2014, pp. 25-28.

11. Bartalev S.A., Ershov D.V., Korovin G.N., Kotelnikov R.V., Lupian E.A., Shchetinskii V.E. Informatsionnaya sistema distantsionnogo monitoringa lesnykh pozharov Federalnogo agentstva lesnogo khozyaystva RF (sostoyaniye i perspektivy razvitiya) [The Federal Forestry Agency of the Russian Federation's Remote Forest Fire Monitoring Information System (Current Status and Development Prospects)]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space], 2008, vol. 2, no. 5, pp. 419-429.

12. Komarova I.A., Ivantsova E.A. Geoinformatsionnaya otsenka agrolandshaftov na testovom poligone «Chernyye Zemli» [Geoinformation Assessment of Agro-Landscapes at the Chernye Zemli Test Site]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye* [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], 2021, no. 1, pp. 452-460.

13. Komarova I.A., Ivantsova E.A. Lesomelioprativnaya otsenka agrolandshaftov Sarpinskoy nizmennosti po dannym distantsionnogo zondirovaniya [Forest Reclamation Assessment of Agro-Landscapes in the Sarpinskaya Lowland Based on Remote Sensing Data]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya* [Successes of Modern Natural Science], 2020, no. 9, pp. 7-12.

14. Korshunov N.A., Savchenkov V.A., Perminov A.V., Koniushenkov M.E. Nauchnoye obosnovaniye metodiki avtomatizirovannogo upravleniya silami i sredstvami pozharotusheniya [Scientific Substantiation of the Methodology of Automated Control of Fire Extinguishing Forces and Means]. *Lesnoy vestnik* [Forest Herald], 2022, vol. 26, no. 3, pp. 75-84.

15. Ovsyankin R.V., Ivantsova E.A. Kompyuternoye kartografirovaniye sokhrannosti zelenykh nasazhdeniy v gorodskikh landshaftakh [Computer Mapping of the Preservation of Green Spaces in Urban Landscapes]. *Izvestiya*

Nizhnevolzhskogo agrouniversistetskogo kompleksa: Nauka i vyssheye professionalnoye obrazovaniye [Proceedings of Nizhnevolzskiy Agrouniversity Complex: Science and Higher Vocational Education], 2016, no. 2 (42), pp. 134-140.

16. Pavlichenko E.A., Ivanov V.V., Miskiv S.I. Ispolzovanie geoinformatsionnykh sistem pri analize i prognoze prirodnykh chrezvychainykh situatsiy na primere monitoringa lesnykh pozharov [The Use of Geographic Information Systems in the Analysis and Forecasting of Natural Emergencies on the Example of Forest Fire Monitoring]. *Tekhnologiy grazhdanskoy bezopasnosti* [Civil Security Technologies], 2004, no. 4, pp. 46-51.

17. Geraskina A.P., Tebenkova D.N., Ershov D.V., Ruchinskaya E.V., Sibirtseva N.V., Lukina N.V. Pozhary kak faktor utraty bioraznoobraziya i funktsiy lesnykh ekosistem [Wildfires as a Factor of the Loss of Biodiversity and Functions of Forest Ecosystems]. *Voprosy lesnoi nauki* [Issues of Forest Science], 2021, vol. 4, no. 2, pp. 1-76.

18. Ryasnov V.A., Ivantsova E.A.Primeneniye metoda deshifrirovaniya kosmosnimkov pri otsenke sostoyaniya lesnykh tsenozov Volgo-Akhtubinskoy poymy [Application of the Space Image Interpretation Method in Assessing the Condition of Forest Coenoses in the Volga-Akhtuba Floodplain]. *Ekologicheskaya bezopasnost i okhrana okruzhayushchey sredy v regionakh Rossii: teoriya i praktika: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Environmental Safety and Environmental Protection in Russian Regions: Theory and Practice. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference]. Volgograd, 2015, pp. 204-209.

19. Sereda E.A., Aksenov S.G. Primenenie bespilotnykh aviatsionnykh sistem pri tushenii lesnykh pozharov [The Use of Unmanned Aerial Vehicles in Extinguishing Forest of Fires]. *Ekonomika stroitelstva* [Economics of Construction], 2023, no. 8, pp. 34-37.

20. Ivantsova E.A. et al. Snizheniye negativnogo vozdeystviya na agrotsenozy putem upravleniya primykayushchimi prirodno-antropogennymi sistemami [Reducing the Negative Impact on Agrocenoses by Managing Adjacent Natural and Anthropogenic Systems]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 3: Economika. Ecologiya* [Science Journal of Volgograd State University. Global Economic System], 2017, vol. 19, no. 4 (41), pp. 138-146.

21. Ivantsova E.A., Novochadov V.V., Rulev A.S., Postnova M.V. *Ekobiotekhnologii optimizatsii aridnykh fitotsenozov yugo-vostoka yevropeyskoy chasti Rossii* [Ecobiotechnology Optimization of Arid Phytocenoses in the South-East of the European Part of Russia]. Volgograd, 2019. 76 p.

22. Sajith Ranatunga et al. Digital Twins for Geospatial Decision-making. *ISPRS TC IV Mid-Term Symposium "Spatial Information to Empower the Metaverse": ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Fremantle, 2024, vol. X-4-2024, pp. 271-278.

23. Ivantsova E.A. Environmental Evaluation of the System of Protective Forest Plantations in Urban Landscapes Volgograd Agglomeration Using GIS-Technologies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Current Problems and Solutions*, 2019, pp. 012036.

24. Ersoy I. A Multi-Criteria Forest Fire Danger Assessment System on GIS Using Literature-Based Model and Analytical Hierarchy Process Model for Mediterranean Coast of Manavgat, Türkiye. *Sustainability*, 2025, vol. 17, no. 5, pp. 1-27.

25. Wang L., Feng J., Mao J., Zhang Y., An J. Multi-Objective Spatial Optimization of Forest Fire Monitoring Networks: An Integrated GIS-MCDM Framework Enhanced by Improved Genetic Algorithms. *PLoS One*, 2025, vol. 20, pp. 1-26. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0338090

26. Nelson D.M., He Yu., Moore G.W.K. Trends and Applications in Wildfire Burned Area Mapping: Remote Sensing Data, Cloud Geoprocessing Platforms, and Emerging Algorithms. *Geomatica*, 2024, no. 76, iss. 1, pp. 1-17.

27. Rothermel R.C. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Ogden, USDA, Forest Service Research Paper, Intermountain forest and range experiment Station, 1972. 40 p.

28. Salam M.A., Soysal O.M., Schneider H. Integration of Wireless Sensor Networks in Geographical Information Systems: A Survey. *MSV*, 2010, pp. 307-314.

29. Silva D., Ferreira T.M., Rodrigues H. Artificial Intelligence in Wildland – Urban Interface Wildfire Management: A Twophase Review Combining Bibliometric Mapping and Thematic Analysis. *Natural Hazards*, 2026, no. 122, pp. 1-30.

Information About the Author

Danil A. Ustinov, Postgraduate Student, Volgograd State University, Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation, nzosa-251_445737@volsu.ru

Информация об авторе

Данил Алексеевич Устинов, аспирант, Волгоградский государственный университет, просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация, nzosa-251_445737@volsu.ru