ТРУДЫ САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
ИНСТИТУТА ЛЕСНОГО ХОЗЯЙСТВА

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

DOI 10.21178/2079-6080.2024.3.113
УДК 630.43:630.57

Совершенствование методологии дистанционного мониторинга пожарной опасности в лесах

© В.А. Славский, С.М. Матвеев, А.В. Мироненко, Д.А. Литовченко

Improving the methodology of remote monitoring of fire hazard in forests

V.A. Slavskiy, S.M. Matveev, A.V. Mironenko, D.A. Litovchenko (Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov)

Currently, the problem of fire safety in forests is becoming global. At the same time, despite all the efforts of forest fire services, it is not possible to significantly reduce the number of fires. Therefore, it is extremely important to develop a relatively low-cost and effective methodology for assessing a fire hazard situation and timely prevention of fires based on the existing forest fire monitoring system. The proposed elements of improving the methodology are based on the application of remote monitoring using machine learning models (artificial intelligence) for the purpose of automated assessment of a fire hazard situation and accounting of forest combustible materials. The developed methodology includes both the main factors of assessing a fire hazard situation, widely used in establishing a fire hazard (climatic, forestry, etc.) and other, no less significant factors (anthropogenic, landscape), not taken into account (not fully taken into account) in the current regulatory and methodological documents and practical technological solutions, which increases the reliability of the results without a significant increase in labor intensity. The methodology contains operational data on the volumes of forest combustible materials, allowing specifying the class of natural fire hazard, which is extremely important for timely management decisions. Proposals for improving the methodology of remote monitoring of fire hazard in forests are easily compatible with the current methodological approaches in the field of forest protection, which allows it to be successfully integrated into the general system of forest fire monitoring. As a result of the conducted research, a theoretical basis was laid for further work in the field of forest fire protection and remote monitoring.

Key words: forest protection, fire hazard, forest fire risk factors, remote monitoring, software

Совершенствование методологии дистанционного мониторинга пожарной опасности в лесах

В.А. Славский, С.М. Матвеев, А.В. Мироненко, Д.А. Литовченко

В настоящее время проблема пожарной безопасности в лесах принимает глобальный характер. При этом, несмотря на все усилия лесопожарных служб, существенно снизить количество пожаров не представляется возможным. Поэтому крайне важно сформировать относительно малозатратную и эффективную методологию оценки пожароопасной ситуации и своевременного предупреждения возникновения пожаров на основе существующей системы лесопожарного мониторинга. Предлагаемые элементы совершенствования методологии основаны на использовании дистанционного мониторинга с применением моделей машинного обучения (искусственного интеллекта – ИИ) с целью автоматизированной оценки пожароопасной ситуации и учета лесных горючих материалов. Разработанная методология включает в себя как основные факторы оценки пожароопасной ситуации, широко применяемые при установлении пожарной опасности (климатические, лесоводственные и др.), так и иные, не менее значимые факторы (антропогенные, ландшафтные), не учитываемые/учитываемые не в полном объеме в действующих нормативно-методических документах и практических технологических решениях, что повышает достоверность результатов без существенного увеличения трудоемкости. Методология содержит оперативные сведения об объемах лесных горючих материалов, позволяющие конкретизировать класс природной пожарной опасности, что крайне важно для своевременного принятия управленческих решений. Предложения по совершенствованию дистанционного мониторинга пожарной опасности в лесах легко совместимы с действующими методическими подходами в области охраны лесов, что позволяет ее успешно интегрировать в общую систему лесопожарного мониторинга. В результате выполненных исследований заложена теоретическая основа для проведения дальнейших работ в области охраны лесов от пожаров и проведения дистанционного мониторинга.

Ключевые слова: охрана лесов, пожарная опасность, лесопожарные факторы риска, дистанционный мониторинг, программное обеспечение

Славский Василий Александрович – профессор каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, д-р с.-х. наук
E-mail:slavskiyva@yandex.ru

Матвеев Сергей Михайлович – заведующий каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, д-р биол. наук, профессор
E-mail: lisovod@bk.ru

Мироненко Алексей Викторович – доцент каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, канд. с.-х. наук
E-mail: alexeymironenko66@gmail.com

Литовченко Дарья Андреевна – доцент каф. лесоводства, лесной таксации и лесоустройства, канд. биол. наук
E-mail: timashchuk90@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»
394087 г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8

Введение

Последствия глобального потепления на территории Европейской части России в настоящее время становятся все более очевидными и вызывают ряд серьезных экологических проблем. Одной из их является возникновение экстремально жарких и засушливых условий, что приводит к увеличению продолжительности пожароопасного периода [30]. По исследованиям Росгидромета [6], в России темпы роста потепления намного превышают средние общемировые значения.

В нашей стране ежегодно регистрируется от 9 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих огромные площади, достигающие нескольких миллионов гектаров [26]. Согласно данным ФГБУ ВНИИПО МЧС, площадь лесных пожаров постоянно увеличивается, а экономический ущерб за последние 20 лет возрос в 6–8 раз [3]. Запас древесины, сгорающей при пожарах, в 1,5 раза превышает объемы лесозаготовок по всем видам рубок, а последствия сказываются на природных системах многие сотни лет после пожара [5]. При этом в настоящее время нет низкозатратных методов, позволяющих существенно снизить уровень пожарной опасности в лесах. По данным Н.А. Петрунина [21], эффективность тушения лесных пожаров на территории России достаточно низкая: средняя площадь в момент обнаружения составляет 7,8 га, а при ликвидации – 658,4 га. Не решена проблема тушения крупных лесных пожаров, более 90 % которых возникает в зоне авиационной охраны лесов [10]. Все это обусловливает первостепенную значимость проблемы охраны лесов – как в нашей стране, так и во всем мире.

Для снижения риска возникновения лесных пожаров используются системы регулярной оценки объема лесных горючих материалов (ЛГМ) [32, 39] и способы оценки развития пожара (моделирование, наземный мониторинг, спутниковые данные, системы БПЛА и др.) [32, 36, 37 и др.].

Исследования по разработке новых и совершенствованию существующих методических подходов для оценки пожароопасной ситуации уже ведутся в разных регионах страны ведущими специалистами в лесной отрасли [5, 8, 11 и др.]. Однако технологические и технические решения, реализуемые в настоящее время в процессе лесопожарного мониторинга, обладают рядом значительных недостатков, в первую очередь – дискретным характером работ и использованием в качестве информационной базы быстроустаревающих таксационных данных. Поэтому крайне важно сформировать относительно малозатратную и эффективную методологию оценки пожароопасной ситуации и своевременного предупреждения возникновения пожаров, базирующуюся на основе действующей системы лесопожарного мониторинга. Первостепенными задачами являются совершенствование методов превентивного управления и разработка автоматизированной системы оценки пожарной опасности в лесах, которая эффективно объединит статические и динамические факторы возникновения пожаров.

Целью работы является создание новых и совершенствование существующих элементов методологии лесопожарного мониторинга с использованием данных дистанционного зондирования Земли и моделей машинного обучения (искусственный интеллект) для повышения эффективности охраны лесов от пожаров.

Программа, объекты и методы исследования

***Программа исследования включает в себя*:**

– подбор объектов исследования, научное обоснование местоположения, размеров, формы и количества постоянных таксационно-дешифровочных пробных площадей (ПП) для проведения на них натурного наземного обследования и летно-съемочных работ с использованием комплекса RGB, гиперспектральной и лидарной съемок на базе беспилотных авиационных систем (БАС);

– выявление и оценку факторов риска возникновения пожарной опасности в лесах;

– формирование обучающих выборок и разработку моделей машинного обучения для определения лесоводственно-таксационных показателей дистанционными методами;

– составление алгоритмов, формирование методических подходов и разработку инструментария для автоматизированной оценки климатических, ландшафтных и антропогенных факторов, влияющих на возникновение пожароопасной ситуации;

– совершенствование методологии дистанционного контроля пожарной опасности в лесах, включающей в себя комплекс факторов, обусловливающих возникновение пожароопасной ситуации.

Объекты исследований представляют собой постоянные таксационно-дешифровочные пробные площади, расположенные на территориях лесной (Калужская область) и лесостепной (Воронежская область) лесорастительных зон. Обследованы участки, пройденные и не пройденные лесными пожарами. Для обеспечения достоверности результатов ПП заложены в выделах, не подвергавшихся как минимум в течение последних 3-х лет рубкам ухода, санитарно-оздоровительным и другим лесохозяйственным мероприятиям. При выборе места закладки и расчете количества пробных площадей для достижения репрезентативности выборки учтены следующие критерии и аспекты: класс природной пожарной опасности – ППО [13] (наиболее широко представлены выделы, отнесенные к 1 и 2 классам ППО); дифференциация насаждений по группам возраста; дифференциация насаждений по доле участия хвойных пород в составе; ландшафтные особенности территории и принадлежность к различным типам лесорастительных условий (ТЛУ), а также вид и интенсивность пожара (при оценке гарей). Кроме того, с использованием дистанционных методов изучены территории лесничеств Воронежской области с целью анализа ландшафтных и антропогенных воздействий на пожарную опасность в лесах. В ходе работы использована информация о динамике погодных условий, полученная по данным официальных метеостанций, находящихся на территории исследования (синоптический индекс 27707 и 34123).

Методы исследования. Основу методического обеспечения *натурного обследования* составляют положения о проведении Государственной инвентаризаций лесов [17], Лесоустроительной инструкции [14], а также иные нормативные и правовые документы [13, 15, 16], справочные материалы и методические рекомендации [7, 19].

Пробные площади закладывались с учетом требований ОСТ 56–69–83 [20]. На пробных площадях проводили сплошной перечет с определением древесной породы и установлением координат каждого дерева, измерение диаметров стволов (на высоте 1,3 м), высоты деревьев, диаметров кроны (в двух направлениях) и санитарного состояния древостоя. Определяли и фиксировали высоту, количество и жизнеспособность подроста и подлеска, а также количество валежа, сухостоя и других лесных горючих материалов. Тип леса устанавливали по шкале В.Н. Сухачева [25], а для определения ТЛУ использовали классификацию П.С. Погребняка [34].

Получение материалов *дистанционного зондирования Земли* (ДЗЗ) осуществлялось с применением комбинированного оборудования, состоящего из RGB, лидарных и гиперспектральных камер, а также приемника GNSS при помощи полезной нагрузки на базе БАС. Все летно-съемочные работы выполнены в соответствии с ГОСТ Р 59328–2021 [4], а также на основе действующих нормативных и правовых документов [9, 18].

Необходимо отметить, что в настоящее время в ряде регионов РФ имеются значительные ограничения на использование БАС и проведение полетов на их основе, что существенно осложняет выполнение работ по получению пространственных данных сверхвысокого разрешения и калибровке разработанных моделей машинного обучения.

Формирование обучающих и контрольных выборок выполнено на основе метода кросс-валидации (перекрестной проверки). Классификация цифровых изображений осуществлена с использованием сверточных нейронных сетей (CNN), что позволило минимизировать долю ручного извлечения признаков и верифицировать данные наземного обследования и материалы ДЗЗ. Для определения ландшафтных параметров лесотаксационных выделов сформирована цифровая модель рельефа, построенная в ГИС QGIS по данным SRTM с применением разработанного авторами инструментария [12].

Дешифрирование таксационных показателей насаждения по материалам ДЗЗ выполнено на основе комплексного методического подхода. Для RGB и гиперспектральной съемки применялись традиционные методы цифровой обработки изображений для поиска / отделения от фона деревьев [22, 28, 29]. При лидарной съемке использованы геометрические методы для интерполяции земной поверхности, а именно: поиск вершины лесного полога, а затем высоты деревьев [33, 35].

Для обработки материалов ДЗЗ использовали программное обеспечение Agisoft PhotoScan Professional, Agisoft Metashape, Photomod: 6.0., LiDAR 360 Framework, а также программы, находящиеся в общем доступе.

При выполнении *статистической обработки* экспериментальных результатов применены методы математического моделирования, корреляционного, регрессионного, дисперсионного и нейросетевого анализа [2, 7], на базе программного продукта STATISTICA-13.0. Выбранные методики соответствуют современному уровню научно-технического развития и обеспечивают репрезентативность выборки по каждому изучаемому показателю на уровне вероятности 0,95.

Результаты исследования

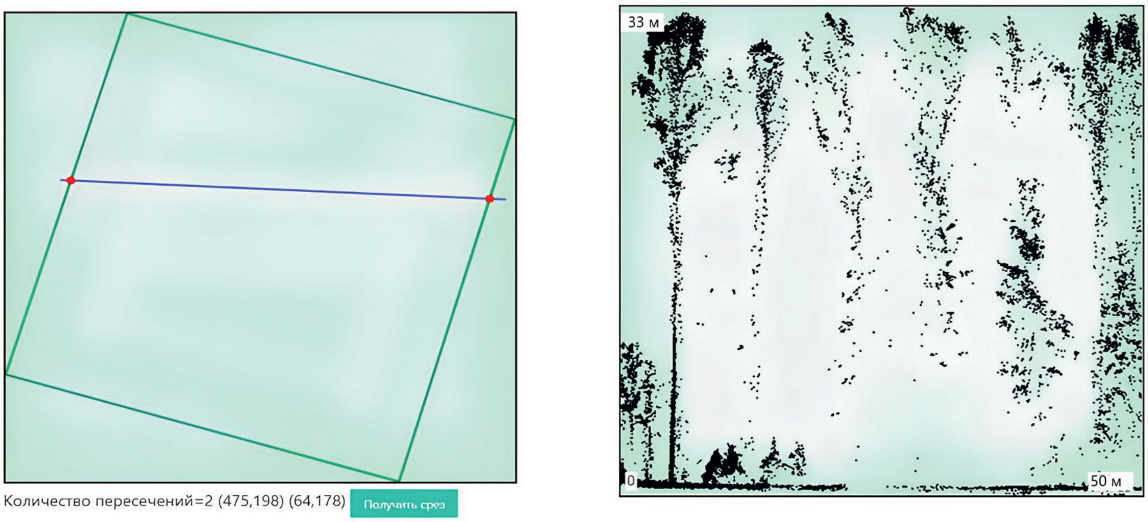
В результате проведенных работ, включающих в себя сбор, систематизацию и анализ материалов натурного обследования и ДЗЗ, сформирована обширная база данных, содержащая таксационные, ландшафтные, лесорастительные, рекреационные, природно-климатические и пирогенные характеристики территории расположения объектов. Собранные сведения представляют собой репрезентативную выборку количественных значений для комплекса изучаемых факторов возникновения пожароопасной ситуации и служат информационной основой для разработки методологии превентивного контроля пожарной опасности в лесах.

Для интеграции и аппроксимации данных, полученных при проведении наземной таксации и дистанционного мониторинга, разработан технико-методический инструментарий для выполнения анализа и дешифрирования информации [40], основанный на технологии машинного обучения и позволяющий определять таксационные показатели насаждения, а также фиксировать наличие лесных горючих материалов в автоматизированном режиме (или с элементами автоматизации). Для достижения автоматизации процесса, были собраны разнородные источники информации (RGB, лидар, гиперспектр) и применены методы искусственного интеллекта на основе CNN. Интеграция различных категорий данных ДЗЗ направлена на получение объединенных сведений на основе информации с различным пространственным и спектральным разрешением. Интегрированные результаты более надежны и точны, чем отдельно взятые источники, что повышает качество информации для принятия управленческих решений.

Предложенный авторский методический подход заключается в следующем: по материалам RGB и опционально-гиперспектральной съемки с использованием ИИ вычисляется древесная порода, а состояние деревьев – с использованием значений вегетационных индексов NDVI (для описания неоднородности растительности), EVI (для более точной дифференциации деревьев по состоянию) и CVI (для определения содержания хлорофилла в лиственном покрове). Применяемые классификаторы искусственного интеллекта достоверно определяют не только породу, но и объемлющий контур вокруг дерева, что позволяет вычислить диаметр кроны. Лидарные данные в совокупности с координатами деревьев позволяют рассчитать высоту древостоя. Высота живой части кроны и ее объем вычисляются на базе облака точек лидарной съемки.

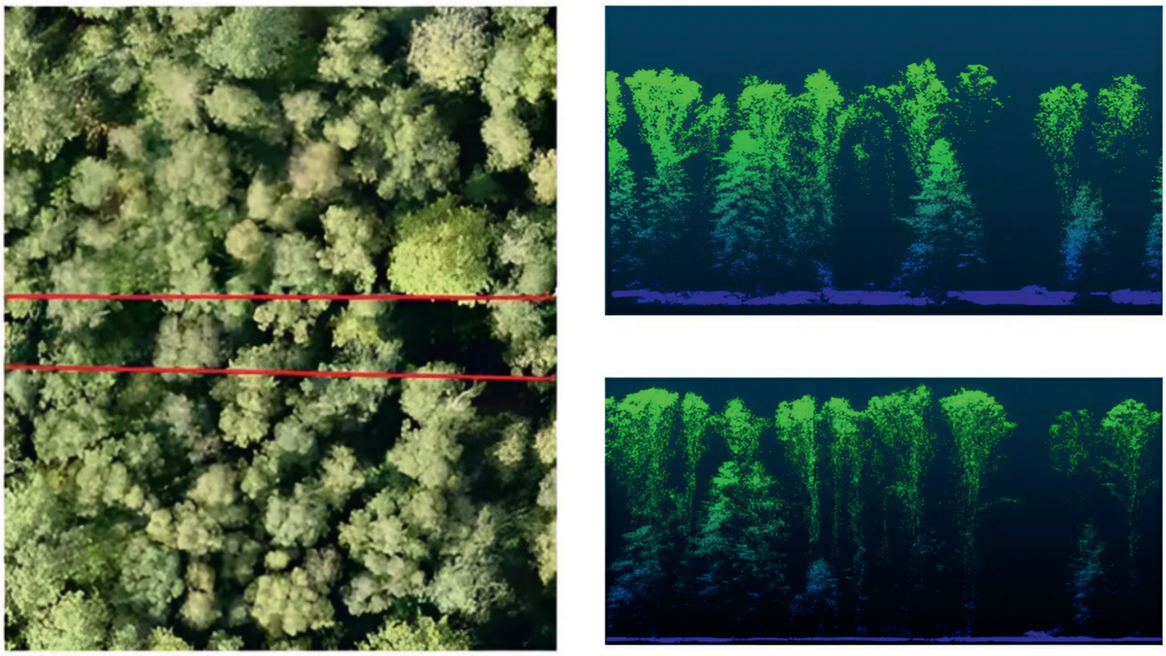
Для выявления сложно определяемых признаков установлены взаимосвязи между таксационными показателями насаждения. С помощью многомерного регрессионного анализа разработаны аллометрические модели, позволяющие достоверно использовать косвенные методы при дешифрировании сложно определяемых (не определяемых с использованием ИИ) таксационных признаков с высокой степенью сходства (R^2 = 0,66–0,91). К таким показателям относятся класс возраста (устанавливается с учетом диаметра кроны и высоты древостоя – прямых дешифровочных признаков, отчетливо различаемых на снимках в автоматизированном режиме), полнота (определяется с учетом диаметра кроны и сомкнутости полога) и запас древостоя (рассчитывается с учетом высоты древостоя, диаметра кроны и полноты).

Важнейшим элементом разработанного инструментария является технология лидарного разреза, позволяющая определить накопление лесных горючих материалов – ЛГМ (подрост, подлесок, валеж и крупный отпад) под пологом древостоя (рис. 1 и 2). Наличие ЛГМ существенно увеличивает риск возникновения пожара, а учет количества и высоты подроста и подлеска, объема и количества валежа позволит скорректировать уровень природной пожарной опасности в лесах.



а) б)

Рис. 1. Отображение лидарных данных на web-интерфейсе: а) – общий вид и местоположение лидарного разреза на исследуемой территории; б) – трехмерная структура насаждения при отображении в виде лидарного разреза



а) б)

Рис. 2. Анализируемые линии среза (а) и их отображение после обработки лидарных данных (б) при изучении насаждений

При верификации сформированных элементов обучающих выборок для определения таксационных показателей насаждения и оценки пожароопасной ситуации в лесах на основе данных ДЗЗ установлено, что непосредственно, в автоматизированном режиме модели искусственного интеллекта определяют древесную породу (достоверность около 90 %), высоту ствола (91 %), диаметр кроны (88 %) и состояние насаждения (в сухую погоду – до 96 %). Высота начала живой части кроны, диаметр ствола и сомкнутость полога, а также подпологовая растительность и накопление валежной древесины, с высокой степенью точности определяются с элементами автоматизации.

Особую актуальность принимает задача ранжирования факторов риска пожарной опасности и установления наиболее значимых из них, что является базовым этапом для формирования общей методологии работы. В качестве ключевых рисков возникновения пожаров в лесных экосистемах выделяют факторы антропогенного (рекреационного) характера, климатические (погодные) условия, лесоводственные характеристики насаждения и рельеф местности. Вышеприведенные группы факторов риска возникновения пожара не оспариваются никем из специалистов, и их влияние на пожароопасную ситуацию подтверждается в ряде научно-исследовательских работ ведущих ученых [1, 21, 27, 31,41 и др.]. Для установления наиболее значимых факторов, расстановки их приоритета и оценки силы влияния на возникновение пожароопасной ситуации проведен дисперсионный анализ (рис. 3).

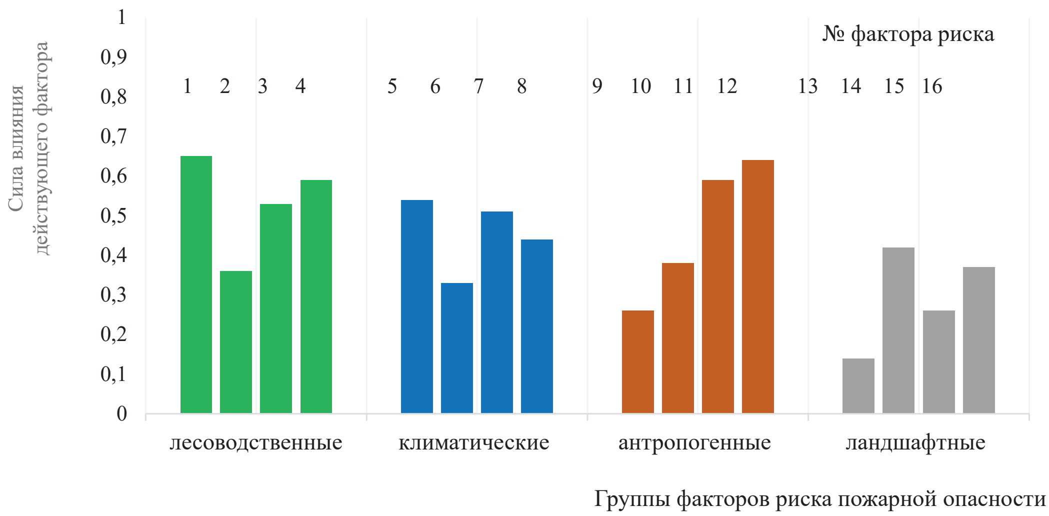


Рис. 3. Уровни значимости факторов риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах

(1 – живые компоненты древостоя; 2 – живые компоненты насаждения; 3 – мертвые компоненты насаждения; 4 – ТЛУ; 5 – температура воздуха; 6 – атмосферные осадки; 7 – влажность воздуха; 8 – скорость ветра; 9 – разветвленность дорожно-тропиночной сети; 10 – лесопожарные риски (наличие рекреационных объектов); 11 – плотность населения и интенсивность посещения;12 – иные факторы хозяйственной деятельности; 13 – высота над уровнем моря; 14 – почвенные условия; 15 – близость водных объектов; 16 – крутизна и экспозиция склона)

Предлагаемая методология контроля пожарной опасности в лесах разработана с целью существенного сокращения объемов наземного мониторинга в области охраны лесов за счет автоматизации процесса и внедрения методов искусственного интеллекта на базе данных ДЗЗ. Использование моделей машинного обучения при определении основных таксационных показателей насаждения и накопления ЛГМ обосновано и апробировано на территории исследуемых объектов.

Основополагающие принципы реализации методологии контроля пожарной опасности в лесах рассматриваются и применяются комплексно. К ним относятся:

1. Актуальность информации о накоплении ЛГМ, а также о состоянии древостоя и других компонентах фитоценоза в целях превентивного контроля и оценки пожарной опасности в лесах.

2. Согласованность предлагаемых методических подходов и существующих методик в области охраны лесов, а также соответствие реализуемой методологии установленным в лесном хозяйстве целям и задачам при повышении рентабельности производственных процессов.

3. Сопоставимость разработанной и предлагаемой к внедрению методологии с уже имеющимися результатами в области охраны лесов и возможность ее интеграции в существующую систему лесопожарного мониторинга.

4. Комплексность учета наиболее значимых факторов риска возникновения пожароопасной ситуации в лесах, в том числе не применяемых (применяемых в недостаточном объеме) в действующих алгоритмах (технологиях).

5. Достоверность практического результата, обеспечиваемая автоматизацией процесса, снижение систематической погрешности и минимизация влияния человеческого фактора в рамках предлагаемых к внедрению технологических решений.

6. Уникальность предложенной методологии и алгоритмов ее реализации обладает высокой степенью научной новизны, не имеет российских аналогов.

Важной составляющей частью методологии является функционал контроля, в соответствии с которым в автоматизированном режиме будет оцениваться пожарная опасность в лесах не только в зависимости от общепринятых критериев (шкала природной пожарной опасности и шкала пожарной опасности по условиям погоды), но и от количественных показателей накопленной массы ЛГМ и других динамических характеристик.

В обобщенном виде методология представлена в виде схемы (рис. 4).

Для оценки пожароопасной ситуации учитывается комплекс климатических (погодных), антропогенных, лесоводственных и ландшафтных групп факторов. Каждый показатель (единичный фактор) рассматриваемых групп влияет на пожарную опасность в лесах, а их суммарная составляющая образует динамичный индекс пожарной опасности.

Особое место в разработанной методологии отведено отдельным уровням оценки пожарной опасности лесных насаждений, с привлечением существующих характеристик.

Характеристики, не изменяющиеся в процессе жизни древостоя (макро- и мезорельеф, гидрография, лесорастительные условия (ТЛУ, тип леса), коренная преобладающая древесная порода). Они устанавливаются заранее и единовременно заносятся в сформированную базу данных. Сведения, рассмотренные на уровне неменяющихся характеристик в процессе жизни древостоя, являются постоянными величинами, поэтому не требуют ежегодного учета и контроля и состоят из 2-х частей: повыдельные данные (ТЛУ, тип леса, коренная древесная порода) и общая информация (лесоклиматический район, гидрография, почвенные условия и т. д.).

Медленно изменяющиеся характеристики (возраст древостоя, высота и диаметр ствола, диаметр крон деревьев, полнота / сомкнутость крон, бонитет, запас, состояние насаждения, дорожно-транспортная сеть, рекреационные объекты, места лесозаготовок, содержание на объекте горючих материалов и др.). Эти характеристики меняются в течение одного пожароопасного сезона в незначительной степени и определяются при проведении авиационного мониторинга с применением комплекса RGB, лидарных

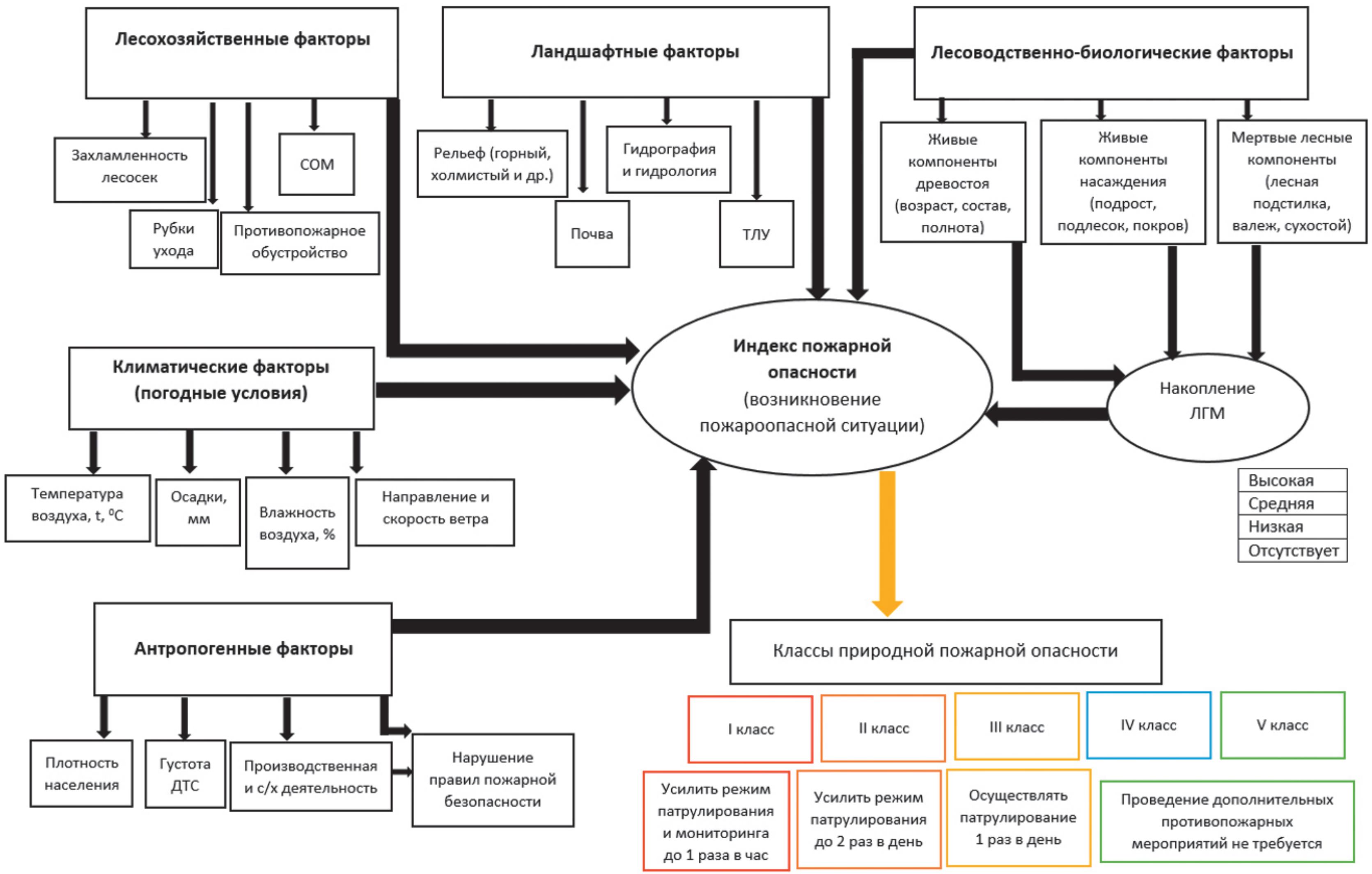


Рис. 4. Схематическая модель оценки и контроля пожароопасной ситуации в лесах

и гиперспектральных съемок. Сведения, получаемые на рассматриваемом уровне, служат основой для установления класса природной пожарной опасности.

Быстро изменяющиеся характеристики (условия погоды — температура, осадки, дефицит влажности воздуха, скорость ветра; интенсивность посещения людьми исследуемой территории и др.). Это данные ежедневного мониторинга, получаемые с ближайшей метеостанции (условия погоды) и результаты корректировки рекреационной нагрузки по условиям погоды. Требуется постоянное внесение метеоданных в систему (модель) превентивной оценки пожарной ситуации — ежедневно после схода снежного покрова и каждые 3 часа во время пожароопасного периода. Ключевые характеристики возникновения пожарной опасности объединены и включены в общую модель, характеризующую пожарную опасность в лесах. Отдельные из них — лесоводственно-биологические и климатические, а также частично — антропогенные и лесохозяйственные — непосредственно определяют степень природной пожарной опасности (ППО) лесных насаждений и, соответственно, позволяют относить их к конкретному классу ППО. Другие — ландшафтные, а также частично — антропогенные и лесохозяйственные — добавляются в общую модель определения пожароопасной ситуации с использованием понижающих или повышающих коэффициентов. Комплексное использование факторов оценки пожароопасной ситуации в лесах (имеющих разную степень влияния) позволяет получить значение индекса пожарной опасности, который служит основой для принятия управленческих решений.

Схема сбора информации, необходимой для определения пожароопасной ситуации в лесах и ее интеграции в общую систему, приведена на рисунке 5.

Реализация получения данных по каждому элементу методологии является основой для дальнейшей разработки превентивной технологии контроля пожарной опасности

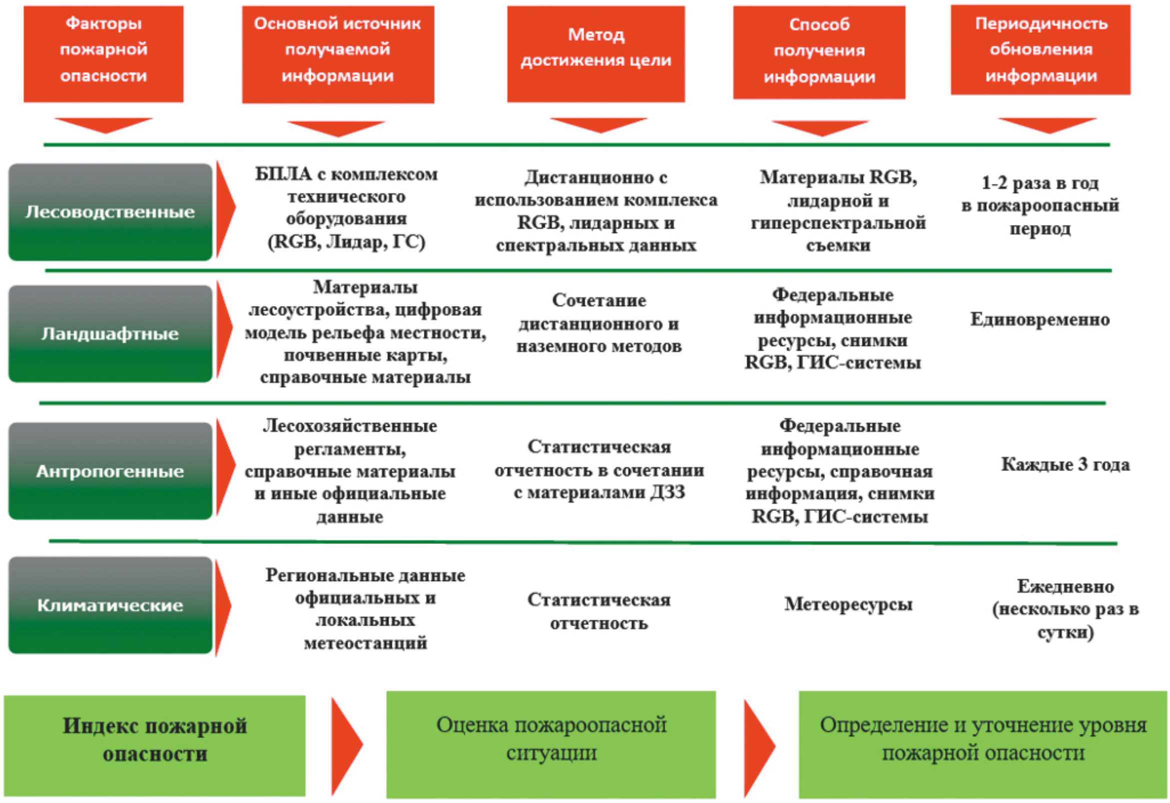


Рис. 5. Схема интеграции информации, необходимой для определения пожароопасной ситуации в лесах

в лесах с использованием ДЗЗ.

Лесоводственно-биологические факторы возникновения пожароопасной ситуации являются первостепенными. Из совокупности лесоводственно-биологических факторов нами выявлены наиболее значимые: состав и возраст древостоя, тип леса или ТЛУ, а также накопление горючих материалов в лесах, поскольку они являются основными проводниками горения. Кроме того, существенное влияние на пожароопасную ситуацию оказывают густота, количество, а также видовой состав подроста и подлеска.

Для их идентификации при использовании методов ДЗЗ и последующего включения в систему оценки ПО применяются модели машинного обучения, а именно:

– состав древостоя (доля хвойных пород в составе) – по RGB-снимкам с использованием технологий ИИ (традиционная классификация и нейросетевой метод), контроль – по данным гиперспектральной съемки;

– высота древостоя и диаметр кроны – при помощи обработки данных RGB и лидарной съемки;

– диаметр ствола – по данным лидарной съемки (в полуавтоматизированном режиме), а также по косвенным показателям, на основе выявленных взаимосвязей путем использования эмпирических зависимостей;

– сомкнутость полога – по RGB и гиперспектральным снимкам в полуавтоматизированном режиме по методу «точечной палетки» – как отношение количества точек, попавших на кроны деревьев, к общему количеству точек;

– состояние древостоя (доля усыхающих и сухостойных деревьев) – по RGB-и спектральным снимкам, с использованием вегетационных индексов NDVI, EVI и CVI;

– валеж (количество и объем древесины) – по данным лидарной съемки, при непосредственном определении длины и диаметра на середине древесного ствола;

– подрост и подлесок – по данным лидарного разреза (количество и высота, определяемые как набор облака точек в установленной проекции) и гиперспектральной съемки (доля участия пород в составе, определяемая в просветах крон и на микрополянах);

– возраст (класс возраста) древостоя (по диаметру кроны, высоте и преобладающей породе), полнота (исходя из сомкнутости полога, возраста и по другим параметрам древостоя) и запас древостоя – по разработанным моделям и уравнениям связи на основании выявленных зависимостей;

– сведения о напочвенном покрове – с применением гиперспектральной съемки (в просветах между кронами или на микрополянах);

– толщина и состав лесной подстилки – крайне сложно определяются при дистанционном мониторинге. В связи с этим необходимо разработать региональные шкалы (таблицы) накопления древесного опада, формирующего лесную подстилку. В таблицах должны быть: дифференциация по породному составу и возрасту древостоя, а также ТЛУ. Данная информация вносится заранее в общую систему оценки пожарной опасности в лесах.

На основе комплекса лесоводственно-биологических факторов (вместе с идентификацией типа леса или ТЛУ, вносимых в систему заранее) устанавливается класс природной пожарной опасности.

Антропогенные факторы оказывают огромное влияние на возникновение пожаров, поэтому должны быть учтены при оценке пожарной опасности. Они устанавливаются как при помощи дистанционного мониторинга, так и путем анализа общедоступной информации. Разработанная авторская методика определения показателя густоты дорожной сети как рекреационного фактора, влияющего на горимость лесов, позволила осуществить зонирование территории по транспортной доступности и использовалась также при определении лесопожарных рисков. Ключевыми антропогенными факторами возникновения пожароопасной ситуации являются:

– густота и разветвленность дорожно-тропиночной сети – определяется поквартально по RGB-снимкам или по картографическим материалам, с использованием расчетного коэффициента транспортной доступности на основе геоинформационной системы QGIS (1):

$$d_s = \frac{L}{S}, \qquad (1)$$

где d_s– густота дорожно-транспортной сети, м/га;

L – протяженность проезжих лесных дорог в квартале, м;

S – площадь квартала, га;

– лесопожарные риски (наличие рекреационных объектов, мест отдыха и др.) – определяются с помощью пространственного анализа векторных данных при зонировании территории лесничеств с использованием геоинформационной системы QGIS;

– плотность населения – определяется такими основными расчетными критериями, как численность на единицу территории, частота и продолжительность посещений леса;

– близость населенных пунктов – устанавливается заранее, на основе имеющейся общедоступной информации;

– интенсивность посещения территории – определяется косвенным способом, исходя из показателей рекреационной нагрузки (стадии дегрессии и класса устойчивости насаждений);

– ведение хозяйственной и производственной деятельности.

Ландшафтные факторы целиком находятся на уровне «неменяющихся характеристик» и являются относительно постоянными величинами. Первостепенную значимость для оценки пожароопасной ситуации имеют почвенные условия (из-за очень высокой корреляции с ТЛУ), характеристика рельефа и распространенность на исследуемой территории водных объектов, которые единовременно заносятся в систему определения пожароопасной ситуации на основании материалов лесоустройства (в рамках ревизионного периода), лесохозяйственных регламентов лесничеств, справочных материалов и других источников.

Повыдельные данные о макро- и мезорельефе (крутизна и экспозиция склона, высота над уровнем моря и др.) могут быть получены с применением разработанного инструментария [12] при создании цифровой модели рельефа местности на уровне отдельных участков. Параметры мезорельефа определяются в автоматизированном режиме, что позволяет их легко интегрировать в предлагаемую общую методологию.

Особую группу риска возникновения пожаров составляют **климатические факторы**. Условия погоды могут кардинальным образом изменить существующую пожароопасную ситуацию. В настоящее время основой для внесения информации о динамике погодных условий в систему лесопожарного мониторинга служат прогнозные данные ближайших метеостанций. Созданная в России метеорологическая сеть не всегда может обеспечить охват всех территорий лесничеств. Предлагается использовать как сведения, с официальных метеостанций, так и информацию локальных метеостанций, дополнительно установленных в лесничествах (полученные не реже чем за сутки до момента расчета пожарной опасности).

Ключевые климатические факторы и периодичность их регистрации во время пожароопасного периода выглядят следующим образом:

– температура воздуха, влажность воздуха, скорость и порывы ветра (измеряются каждые 3 часа);

– количество осадков (измеряется каждые 12 часов);

– количество опасных природных явлений (измеряется каждые 24 часа).

Реализация предложенной методологии на практике достигается при помощи специально *разработанного программного обеспечения*, позволяющего лесничествам и другим ведомственным организациям принимать оперативные управленческие решения в области охраны лесов. Программное обеспечение для определения и корректировки класса природной пожарной опасности было разработано авторами ранее и являлось основой для совершенствования расчета возникновения пожароопасной ситуации и обобщения факторов риска пожарной опасности [23].

Интеграция сведений о накоплении ЛГМ, получаемых в ходе наземной таксации и при использовании данных ДЗЗ, заключается в переводе измерения биомассы накопленных горючих материалов из абсолютных единиц в относительные – баллы, что позволит создать единую систему расчета пожарной опасности. Специально созданная для этой цели компьютерная программа позволяет откалибровать балльную систему оценки степени природной пожарной опасности лесных насаждений на основе 4-х блоков информации: лесоводственные, антропогенные, ландшафтные факторы и условия погоды, каждый из которых имеет различный уровень значимости и вводится в систему с определенным коэффициентом.

На рисунке 6 показан фрагмент интерфейсной формы программы с обозначениями элементов управления, на примере расчета лесоводственных факторов возникновения пожарной опасности. Результатом работы программы является уточненный класс пожарной опасности лесного участка, рассчитанный с точностью до 0,1.

Для классификации горючих материалов использованы оценочные градации, исходя из действующих нормативно-правовых документов [14, 17], обзора научных трудов [24, 38, 40] и выполненного статистического анализа.

Для установления и прогнозирования степени (класса) пожарной опасности насаждений, кроме характеристик древесного полога и иных компонентов фитоценоза, особую значимость приобретают ландшафтные и геоморфологические характеристики, определяющие тип лесорастительных условий и тип леса. Для реализации предложенного алгоритма при проведении дистанционного мониторинга, предложен упрощенный модельный вариант распределения степени пожарной опасности в зависимости от ТЛУ. С учетом предлагаемой нами привязки ТЛУ к макро- и мезорельефу местности, а также преобладающей древесной породы в насаждении, аналогичный методический подход позволяет сразу переходить

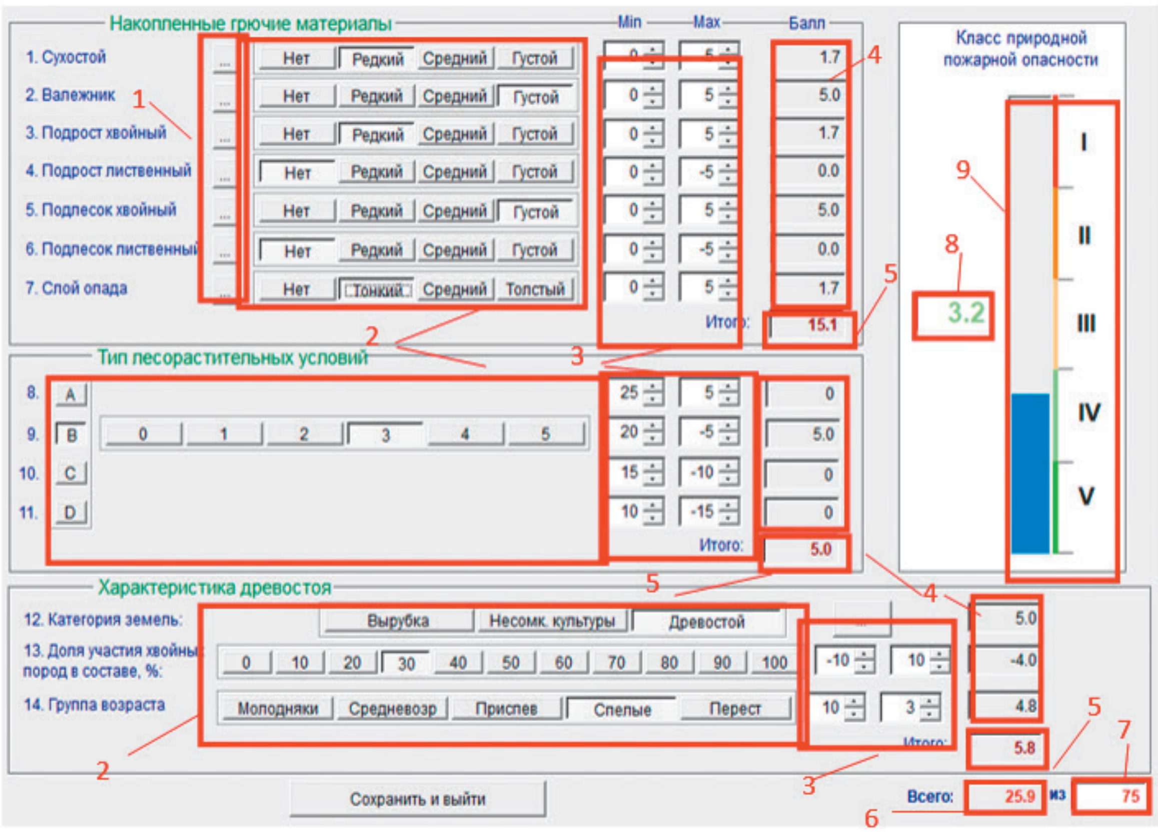


Рис. 6. Интерфейсная форма программы для расчета класса пожарной опасности лесных насаждений и ее элементы для лесоводственных факторов:

1) элементы управления настройками показателей в натуральных единицах измерения для блока «Накопленные горючие материалы»; 2) элементы управления для оценки показателей блока – оценочная шкала; 3) элементы управления для настройки шкалы оценочных баллов; 4) рассчитанный оценочный балл пожарной опасности для каждого таксационного показателя; 5) итоговый балл для блока; 6) общий оценочный балл лесного участка; 7) максимально возможный балл при оценке лесоводственных факторов пожарной опасности лесного участка (для перевода в пятибалльную систему); 8) рассчитанный класс природной пожарной опасности по пятибалльной шкале; 9) графическое изображение уровня природной пожарной опасности лесного участка

к установлению класса ППО для насаждения.

Полученный класс пожарной опасности следует интерпретировать по шкале И.С. Мелехова [13], где уровень природной пожарной опасности снижается по мере увеличения рассчитанного класса от 1 до 5. Для каждого оцениваемого параметра оценочной шкалы предусмотрена возможность регулировки пределов изменения баллов, с целью учета региональных особенностей и соблюдения лесохозяйственных нормативов.

Аналогичным образом в единую систему учета риска возникновения пожароопасной ситуации добавляются значения антропогенных и ландшафтных факторов, а также условий погоды. Визуальное отображение результатов позволяет объективно отразить степень влияния каждого из оцениваемых показателей на итоговый показатель и перевести результаты оценки в пятибалльную шкалу.

В дальнейшем предполагается внедрение разработанных методологических основ в общую стратегию управления лесами на уровне профильных министерств и ведомств, через разрабатываемые технологические и организационные решения.

Выводы

1. На основании экспериментальных результатов, представляющих репрезентативную выборку, получены новые сведения о взаимосвязях лесоводственно-таксационных характеристик насаждений, позволяющие с высокой степенью достоверности (при R^2 = 0,66–0,91) использовать современные методы при дешифрировании лесных массивов.

2. Разработан технико-методический инструментарий и сформированы обучающие выборки моделей машинного обучения, позволяющие определять ключевые параметры древостоя с применением искусственного интеллекта (для отдельных параметров с элементами автоматизации) при проведении дистанционного мониторинга. Степень сходства при верификации данных наземного обследования и материалов ДЗЗ варьировала в пределах от 81 до 96 %.

3. Разработан программный продукт, позволяющий прогнозировать вероятность возникновения пожароопасной ситуации и в автоматизированном режиме оценивать класс пожарной опасности, что является основой для принятия оперативных управленческих решений.

4. Определены ключевые группы факторов риска возникновения пожароопасной ситуации и установлен их приоритет: лесоводственно-биологические характеристики насаждения – 33 %, антропогенное воздействие на лесной участок – 30 %, погодные условия – 25 % и компоненты ландшафта – 12 %.

5. Сформулирована методология контроля пожарной опасности в лесах, имеющая следующие основные преимущества по сравнению с существующими аналогами:

– определение класса природной пожарной опасности и степени пожароопасной ситуации происходит дистанционными методами, что позволяет существенно снизить объемы наземных работ и, следовательно, сократить трудозатраты на мониторинг;

– оценка и контроль пожарной опасности лесных земель выполняется автоматизированным способом на основе внедрения моделей машинного обучения, что снижает долю субъективизма в оценках и позволяет минимизировать влияние человеческого фактора;

– разработанная методология включает в себя как основные факторы оценки пожароопасной ситуации, широко применяемые при установлении пожарной опасности (климатические, лесоводственные и др.) так и иные, не менее значимые факторы (антропогенные, ландшафтные), не учитываемые (учитываемые не в полном объеме) в действующих нормативно-методических документах и практических технологических решениях, что повышает достоверность результатов без увеличения трудоемкости;

– оперативные сведения об объемах лесных горючих материалов позволят конкретизировать класс природной пожарной опасности, что крайне важно для своевременного принятия управленческих решений;

– предложенная методология легко совместима с действующими методическими подходами в области охраны лесов, что позволяет ее успешно интегрировать в общую систему лесопожарного мониторинга.

Полученные результаты могут быть использованы не только для осуществления дистанционного мониторинга в лесах, контроля пожарной опасности, оценки потерь древесных и недревесных ресурсов, а также для формирования отраслевых рекомендаций, нормативных и правовых актов на уровне профильных министерств и ведомств, направленных на повышение эффективности действий по управлению пожарной опасностью лесопожарных учреждений и органов исполнительной власти.

Работа выполнена в рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ ФЗУР-2024–0002) «Разработка технологических решений, направленных на повышение эффективности лесопожарного мониторинга и детализацию оценки последствий лесных пожаров в условиях Центральной лесостепи» (регистрационный номер 1023083100013–2–4.1.2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андреев, Ю.А. Результаты оценки лесопожарных рисков как основа планирования противопожарных мероприятий / А.Ю. Андреев, С.П. Амельчугов, В.М. Груманс // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2014. – № 4. – С. 59–70.
2. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : Учеб. пособие / В.Е. Гмурман. – 12-е изд., перераб. – М. : Высшее образование, 2006. – 479 с.
3. Гончаренко, В.С. Пожары и пожарная безопасность / В.С. Гончаренко, Т.А. Чечетина, В.И. Сибирко, С.И. Мартемьянов, О.В. Надточий, П.В. Полехин, А.А. Козлов, М.А. Чебуханов // ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2022. – 114 с.
4. ГОСТ Р 59328–2021 «Аэрофотосъемка топографическая. Технические требования». – М. : Стандартинформ, 2021. – 49 с.
5. Долгов, А.А. Методология оценки лесопожарных рисков – основа поддержки принятия решений в кризисных ситуациях, вызванных лесными пожарами / А.А. Долгов, Е.Н. Сумина // Технологии гражданской безопасности. – 2007. – № 3 (13). – С. 79–83.
6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2018 г. – М. : Росгидромет, 2019. – 79 с. – ISBN 978-5-906099-58-7.
7. Доспехов, Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований) : Учебник / Б.А. Доспехов. – М. : Колос, 2011. – 547 с.
8. Залесов, С.В. Уточненная шкала распределения участков лесного фонда по классам природной пожарной опасности / С.В. Залесов, Г.А. Годовалов, Е.Ю. Платонов // Аграрный вестник Урала. – 2013. – № 10 (116). – С. 45–49.
9. Инструкция о порядке допуска должностных лиц и граждан Российской Федерации к государственной тайне от 6 февраля 2010 года № 63 с изменениями на 29 октября 2022 года. – URL: https://docs.cntd.ru/document/902197583 (дата обращения: 03.08.2024).
10. Коршунов, Н.А. Оценка состояния лесопожарной системы страны / Н.А. Коршунов, В.А. Савченкова, А.В. Перминов, М.С. Калинин // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. – 2019. – № 3. – С. 82–93. – URL: http://lhi.vniilm.ru/http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.07 (дата обращения: 03.08.2024).
11. Лабоха, А.К. Совершенствование методики классификации уровня пожарной опасности в лесах с использованием метеорологических и аэрокосмических данных / А.К. Лабоха, А.Ю. Шамына, А.Д. Ардяко // Доклады БГУИР. – 2022. – № 20 (6). – С. 85–93.
12. Мироненко, А.В. Алгоритм актуализации лесоустроительной информации и его апробация в Воронежской области / А.В. Мироненко, С.М. Матвеев, В.А. Славский, А.Н. Водолажский, Д.А. Литовченко // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2022. – № 4. – С. 85–98.
13. Об утверждении классификации природной пожарной опасности лесов и классификации пожарной опасности в лесах в зависимости от условий погоды : Приказ Федерального агентства лесного хозяйства от 05.07.2011 г. № 287 – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118509/ (дата обращения: 16.07.2024).
14. Об утверждении Лесоустроительной инструкции: Приказ Минприроды России от 05.08.2022 № 510. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/405266223/ (дата обращения: 16.07.2024).

15. Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах : Постановление Правительства Российской Федерации от 7 октября 2020 года № 1614 – URL: https://docs.cntd.ru/document/565945769 (дата обращения: 16.07.2024).
16. Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах : Постановление Правительства Российской Федерации от 9 декабря 2020 года № 2047. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573053313 (дата обращения: 25.07.2024).
17. Об утверждении Порядка проведения государственной инвентаризаций лесов: Приказ Минприроды России от 27 сентября 2021 года № 686. – URL: https://docs.cntd.ru/document/727092651 (дата обращения: 16.07.2024).
18. Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации Постановление Правительства Российской Федерации от 11.03.2010 г. № 138 (с изменениями на 2 декабря 2020 года). – URL: https://docs.cntd.ru/document/902207152 (дата обращения: 05.07.2024).
19. Орлов, М.М. Лесная таксация / М.М. Орлов. – 3-е изд., пересмотр. и доп. – Л. : Лесное хозяйство и лесная промышленность, 1986. – 532 с.
20. ОСТ 56–69–83 «Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки». Введен 01.01.84. – 59 с.
21. Петрунин, Н.А. Индикативный анализ горимости лесов в России / Н.А. Петрунин // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2022. – № 4. – С. 115–137.
22. Самойлович, Г.Г. Применение аэрофотосъемки и авиации в лесном хозяйстве: Учебник / Г.Г. Самойлович. – М. : Лесная промышленность, 1964. – 486 с.
23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022683955 РФ. Программа для расчета класса природной пожарной опасности лесных насаждений: дата регистрации 09.12.2022; Бюл. № 12 / Мироненко А.В., Матвеев С.М., Славский В.А.; правообладатель ФГБОУ ВО «ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова». – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ.
24. Славский, В.А. Таксационно-дешифровочные показатели насаждений как основа разработки моделей машинного обучения для дистанционного мониторинга лесов / В.А. Славский, А.В. Мироненко, С.М. Матвеев, Д.А. Литовченко // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2022. – № 4. – С. 99–114.
25. Сукачев, В.Н. Основы лесной типологии и биогеоценологии / В.Н. Сукачев // Избранные труды. В 3-х томах. Т. 1. – Л. : Наука, Ленингр. отделение, 1972. – 420 с.
26. Федеральное агентство лесного хозяйства. Официальный сайт. – URL: https://rosleshoz.gov.ru/ (дата обращения: 05.11.2022).
27. Artés, T. and all. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. / T. Artés, D. Oom, D. de Rigo, T.H. Durrant, P. Maianti, G. Libertà, J. San-Miguel-Ayanz // Sci. Data. 2019. – Nov. 29; 6 (1), p. 296. – DOI: 10.1038/s41597-019-0312-2.
28. Getzin, S. Assessing biodiversity in forests using very high resolution images and unmanned aerial vehicles / S. Getzin, K. Wiegand, I. Schoning // Methods in Ecology and Evolution. 2012. – vol. 3. – P. 397–404.
29. Gini, R. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy / R. Gini, D. Passoni, L. Pinto, G. Sona // European Journal of Remote Sensing. 2014. – Vol. 47 (1). – P. 251–269.
30. FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. – DOI: https://doi.org/10.4060/ca9825en – ISBN 978-92-5-134154-4.
31. Hernandez, K. Machine learning algorithms applied to wildfire data in California's central valley / K. Hernandez, A.B. Hoskins // Trees, Forests and People. – 2024. – V. 15, p. 100516. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100516. – ISSN 2666-7193.
32. Labenski, P. Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning / P. Labenski, M. Ewald, S. Schmidtlein, F.E. Fassnacht // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. –2022. – 29 April. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102799.
33. Marselis, S. Mapping forest fuel structure with LiDAR / S. Marselis // Australian National University Press. – 2014. – P. 1–35.
34. Migunova, E.S. Forest typology G.F. Morozov – A.A. Krudener – P.S. Pogrebnyak – the theoretical basis of forestry / E.S. Migunova// Forestry Bulletin – 2017. – Vol. 5. – P. 52–63.
35. Pirotti, F. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: A review of investigations and methods / F. Pirotti // I forest – Biogeosci. – 2011. – P. 100–106.

36. Pourghasemi, H.R. Application of learning vector quantization and different machine learning techniques to assessing forest fire influence factors and spatial modeling /H.R. Pourghasemi, A. Gayen, R. Lasaponara, J.P. Tiefenbacher // EnvironRes. – 2020, May; 184:109321. – DOI: 10.1016/j.envres.2020.109321.
37. Rafaqat, W. Study of Driving Factors Using Machine Learning to Determine the Effect of Topography, Climate, and Fuel on Wildfire in Pakistan / W. Rafaqat, M. Iqbal, R. Kanwal, W. Song // Remote Sensing. – 2022. – N 14 (8). – DOI: https://doi.org/10.3390/rs14081918.
38. Shin, J. Comparing Modeling Methods for Predicting Forest Attributes Using LiDAR Metrics and Ground Measurements / J. Shin, H. Temesgen, J.L. Strunk, T. Hilker// Can. J. Remote Sens – 2016. – Vol. 42. – P. 739–765.
39. Slavskiy, V. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in *Pine* Forests:A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain / V. Slavskiy, D. Litovchenko, S. Matveev, S. Sheshnitsan, M.V. Larionov // Land– 2023. – Vol. 12, N 1. – P. 103. – DOI: https://doi.org/10.3390/land12010103.
40. Slavskiy, V. Assessment of Phytomass and Carbon Stock in the Ecosystems of the Central Forest Steppe of the East European Plain: Integrated Approach of Terrestrial Environmental Monitoring and Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles / V. Slavskiy, S. Matveev, S. Sheshnitsan, D. Litovchenko, M.V. Larionov, A. Shokurov, P. Litovchenko, N. Durmanov // Life. – 2024. –N 14. – P. 632. – DOI: https://doi.org/10.3390/life14050632.
41. Stuart, M. A comparison of fire danger rating systems for use in forests / M. Stuart // Australian Meteorological and Oceanographic Journal – 2009. – N 58. – P. 41–48.

REFERENCES

1. Andreev Yu.A., Amelchugov S.P., Grumans V.M. Results of forest fire risk assessment as a basis for planning fire prevention measures. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute [Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva]*, 2014, no. 4, pp. 59–70. (In Russian).
2. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics. Textbook. Allowance.12th ed., revised. Moscow, Higher education, 2006, 479 p. (In Russian).
3. Goncharenko V.S., Chechetina T.A., Sibirko V.I., Martemyanov S.I., Nadtochiy O.V., Polekhin P.V., Kozlov A.A., Chebukhanov M.A. Fires and fire safety. *FGBU VNIIPO EMERCOM of Russia [FGBU VNIIPO MCHS Rossii]*, 2022, 114 p. (In Russian).
4. GOSt R 59328–2021 “Topographic aerial photography. Technical requirements". Standartinform, Moscow, Standardinform, 2021, 49 p. (In Russian).
5. Dolgov A.A., Sumina E.N. Methodology for assessing forest fire risks – the basis for supporting decision-making in crisis situations caused by forest fires. *Civil security technologies [Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti]*, 2007, no. 3 (13), pp. 79–83. (In Russian).
6. Report on climate features in the Russian Federation for 2018.Moscow, 2019, 79 p. ISBN 978-5-906099-58-7. (In Russian).
7. Dospehov B.A. Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results). Textbook. Moscow, Ear,2011, 547 p. (In Russian).
8. Zalesov S.V., Godovalov G.A., Platonov E.Yu. Refined scale for the distribution of forest areas by natural fire hazard classes. *Agrarian Bulletin of the Urals [Agrarnyj vestnik Urala]*, 2013, no. 10 (116), pp. 45–49. (In Russian).
9. Instruction on the procedure for accessing officials and citizens of the Russian. Federation to state secrets dated February 6, 2010 no. 63, as amended on October 29, 2022.URL: https://docs.cntd.ru/document/902197583(date of access: 03/08/2024). (In Russian).
10. Korshunov N.A., Savchenkova V.A., Perminov A.V., Kalinin M.S. Assessment of the state of the country's forest fire system. *Forestry. Information – electron. online journal [Lesokhoz. inform.]*, 2019, no. 3, pp. 82–93. URL: http://lhi.vniilm.ru/ http://dx.doi.org/10.24419/LHI.2304-3083.2019.3.07(date of access: 03/08/2024). (In Russian).
11. Laboha A.K., Shamyna A.Yu., Ardyako A.D. Improving the methodology for classifying the level of fire danger in forests using meteorological and aerospace data. *Reports of BSUIR [Doklady BGUIR]*, 2022, no. 20 (6), pp. 85–93. (In Russian).

12. Mironenko A.V., Matveev S.M., Slavskiy V.A., Vodolazhskiy A.N., Litovchenko D.A. Algorithm for updating forest management information and its testing in the Voronezh region. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute [Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva]*, 2022, no. 4, pp. 85–98. (In Russian).
13. On approval of the classification of natural fire danger in forests and the classification of fire danger in forests depending on weather conditions. Order of the Federal Forestry Agency dated July 5, 2011 No. 287. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_118509/ (date of access: 16/07/2024). (In Russian).
14. On approval of the Forest Management Instructions: Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated 05.08.2022 No. 510. URL: https://docs.cntd.ru/document/351878696?ysclid=lzq011xhik706851214 (date of access: 16/07/2024). (In Russian).
15. On approval of Fire Safety Rules in Forests: Decree of the Government of the Russian Federation of October 7, 2020 No. 1614. URL: https://docs.cntd.ru/document/565945769(date of access: 16/07/2024). (In Russian).
16. On approval of the Rules for sanitary safety in forests: Decree of the Government of the Russian Federation of December 9, 2020 No. 2047. URL: https://docs.cntd.ru/document/573053313(date of access: 25/07/2024). (In Russian).
17. On approval of the Procedure for conducting state forest inventories. Order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated September 27, 2021 No. 686. URL: https://docs.cntd.ru/document/727092651(date of access: 16/07/2024). (In Russian).
18. On approval of the Federal Rules for the Use of the Airspace of the Russian Federation Decree of the Government of the Russian Federation dated March 11, 2010 No. 138 (as amended on December 2, 2020. URL: https://docs.cntd.ru/document/902207152(date of access: 05/07/2024). (In Russian).
19. Orlov M.M. Forest taxation. 3rd ed., revision and additional. Leningrad, Forestry and forest industry, 1986, 532 p. (In Russian).
20. OSt 56–69–83 "Test areas for forest management. Bookmark methods". Introduced 01/01/84, 59 p. (In Russian).
21. Petrunin N.A. Indicative analysis of forest fire rates in Russia. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute [Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo institute lesnogo khozyajstva]*, 2022, no. 4, pp. 115–137. (In Russian).
22. Samoilovich G.G. Application of aerial photography and aviation in forestry. Textbook. Moscow, 1964, 486 p. (In Russian).
23. Certificate of state registration of a computer program N 2022683955 of the Russian Federation. Program for calculating the natural fire hazard class of forest plantations: registration date 12/09/2022; Bull. N 12. Mironenko A.V., Matveev S.M., Slavsky V.A.; copyright holder of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “VGLTU named after. G.F. Morozov". Registered in the Register of Computer Programs. (In Russian).
24. Slavskiy V.A., Mironenko A.V., Matveev S.M., Litovchenko D.A. Taxation and interpretation indicators of plantings as the basis for the development of machine learning models for remote monitoring of forests. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute [Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyajstva]*, 2022, no. 4, pp. 99–114. (In Russian).
25. Sukachev V.N. Fundamentals of forest typology and biogeocenology. Selected works. In 3 volumes. Vol. 1. Leningrad, Nauka, Leningrad. Department, 1972. 420 p. (In Russian).
26. Federal Forestry Agency. Official website. – URL: https://rosleshoz.gov.ru/ (date of access: 05/11/2022).
27. Artés T., Oom D., de Rigo D., Durrant T.H., Maianti P., Libertà G., San-Miguel-Ayanz J. A global wildfire dataset for the analysis of fire regimes and fire behaviour. *Sci. Data.* 2019, Nov. 29, no. 6 (1), p. 296. DOI: 10.1038/s41597-019-0312-2. PMID: 31784525.
28. Getzin S. Wiegand K., Schoning I. Assessing biodiversity in forests using very high resolution images and unmanned aerial vehicles. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, vol. 3, pp. 397–404.
29. Gini R., Passoni D., Pinto L., Sona G. Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and tree classification: A test in a park area of northern Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 2014, vol. 47 (1), pp. 251–269.
30. FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. Rome. DOI: https://doi.org/10.4060/ca9825en. ISBN 978-92-5-134154-4.
31. Hernandez K., Hoskins A. B. Machine learning algorithms applied to wildfire data in California's central valley. *Trees, Forests and People*, 2024, v. 15, 100516.DOI: https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100516. ISSN 2666-7193.

32. Labenski P., Ewald M., Schmidtlein S., Ewald Fassnacht F. Classifying surface fuel types based on forest stand photographs and satellite time series using deep learning / *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022, 29 April. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102799.
33. Marselis S. Mapping forest fuel structure with LiDAR. *Australian National University Press*, 2014, pp. 1–35.
34. Migunova E.S. Forest typology G.F. Morozov – A.A. Krudener – P.S. Pogrebnyak – the theoretical basis of forestry. *Forestry Bulletin*, 2017, vol. 5, pp. 52–63.
35. Pirotti F. Analysis of full-waveform LiDAR data for forestry applications: A review of investigations and methods. *Iforest – Biogeosci.*, 2011, pp. 100–106.
36. Pourghasemi H.R., Gayen A., Lasaponara R., Tiefenbacher J.P. Application of learning vector quantization and different machine learning techniques to assessing forest fire influence factors and spatial modeling. *Environ Res.*, 2020, 184:109321. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109321.
37. Rafaqat W., Iqbal M., Kanwal R., Song W. Study of Driving Factors Using Machine Learning to Determine the Effect of Topography, Climate, and Fuel on Wildfire in Pakistan. *Remote Sensing*, 2022, no. 14 (8). DOI: https://doi.org/10.3390/rs14081918.
38. Shin J., Temesgen H., Strunk J.L., Hilker T. Comparing Modeling Methods for Predicting Forest Attributes Using LiDAR Metrics and Ground Measurements. *Can. J. Remote Sens*, 2016, vol. 42, pp. 739–765.
39. Slavskiy V., Litovchenko D., Matveev S., Sheshnitsan S., Larionov M.V. Assessment of Biological and Environmental Factors Influence on Fire Hazard in Pine Forests: A Case Study in Central Forest-Steppe of the East European Plain. *Land*, 2023, vol. 12, no. 1, pp. 103. DOI: https://doi.org/10.3390/land12010103.
40. Slavskiy V., Matveev S., Sheshnitsan S., Litovchenko D., Larionov M.V., Shokurov A., Litovchenko P., Durmanov N. Assessment of Phytomass and Carbon Stock in the Ecosystems of the Central Forest Steppe of the East European Plain: Integrated Approach of Terrestrial Environmental Monitoring and Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles. *Life,* 2024, no. 14, p. 632. DOI: https://doi.org/10.3390/life14050632.
41. Stuart M. A comparison of fire danger rating systems for use in forests. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 2009, no. 58, pp. 41–48.

Статья поступила в редакцию 30.08.2024