

УПРАВЛЕНИЕ ЛЕСАМИ, ЛЕСОУСТРОЙСТВО И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

FOREST MANAGEMENT, FOREST INVENTORY AND INFORMATION SYSTEMS IN FORESTRY

УДК 630*431

**А. А. Пушкин, В. В. Коцан, В. П. Машковский,
Н. Я. Сидельник, П. В. Севрук**

Белорусский государственный технологический университет

БАЗА ДАННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

В рамках разработки методических рекомендаций по прогнозированию распространения лесных пожаров одним из первых этапов работ является создание базы данных с их детальной характеристикой. С целью определения объектов исследований проведен анализ зарегистрированных лесных пожаров на основании ведомственной документации Министерства лесного хозяйства и Министерства по чрезвычайным ситуациям. Полевые исследования охватили 10 лесохозяйственных учреждений Министерства лесного хозяйства. В полевых условиях на основании предварительно подготовленных картографических материалов с помощью GNSS-приемника проводилась съемка фактических границ пожаров и уточнялись таксационные характеристики древостоев. В камеральных условиях на основании пространственного анализа определялась ближайшая к месту возгорания метеорологическая станция и по времени начала тушения и ликвидации лесного пожара собиралась информация о метеорологических показателях во время распространения лесного пожара. Вся собранная информация накапливается в базе данных и разделяется на 3 части: метеорологические данные, лесоводственно-таксационные данные и общие данные о лесном пожаре. Подготовленная база данных включает в себя детальную характеристику 101 лесного пожара, произошедшего в лесном фонде Республики Беларусь за 2018–2022 гг. Собранные в полевых условиях характеристики позволяют с различных сторон рассмотреть процесс распространения лесного пожара и разработать алгоритмы их прогнозирования. Методика предусматривает совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах. Данный подход позволит постоянно увеличивать точность пространственно-временного моделирования возможного развития лесных пожаров.

Ключевые слова: лесной пожар, лесное насаждение, математическая модель, база данных, метеорологические показатели, эллиптическая модель, информационная система.

Для цитирования: Пушкин А. А., Коцан В. В., Машковский В. П., Сидельник Н. Я., Севрук П. В. База данных характеристик лесных пожаров // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2024. № 1 (276). С. 5–14.

DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-1.

**A. A. Pushkin, V. V. Kotsan, V. P. Mashkovsky,
N. Ya. Sidelnik, P. V. Sevruck**

Belarusian State Technological University

THE DATABASE OF THE FOREST FIRE CHARACTERISTICS

As part of the development of methodological recommendations for predicting the spread of forest fires, one of the first stages of work is the creation of a database with their detailed characteristics. In order to identify research objects, an analysis of registered forest fires was carried out on the basis of departmental documentation

of the Ministry of Forestry and the Ministry of Emergency Situations. Field research covered ten forestry institutions of the Ministry of Forestry. In the forest, based on previously prepared cartographic materials, the actual boundaries of the fires were surveyed using a GNSS receiver and the taxational stands characteristics were clarified. In the office conditions, based on the spatial analysis, the meteorological station closest to the place of forest ignition was determined and based on the time of the start of extinguishing and eliminating the forest fire, information about meteorological indicators during the spread of the forest fire was collected. All collected information is accumulated in the database and divided into three parts: meteorological data, forestry and taxation data and general data on forest fire. The prepared database includes a detailed description of 101 forest fires that occurred in the forest fund of the Republic of Belarus for the period 2018–2022. The characteristics collected in the field will allow us to consider the process of spreading a forest fire from different sides and develop algorithms for their forecasting. The methodology provides for the improvement of computational algorithms, taking into account subsequent updates of the database, which includes new information about fires occurring in the forest fund. This approach will allow to constantly increase the accuracy of the spatio-temporal modeling of the possible development of forest fires.

Keywords: forest fire, forest stand, mathematical model, database, meteorological indicators, elliptical model, information system.

For citation: Pushkin A. A., Kotsan V. V., Mashkovsky V. P., Sidelnik N. Ya., Sevruck P. V. The database of the forest fire characteristics. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2024, no. 1 (276), pp. 5–14 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2024-276-1.

Введение. Пожары являются одним из наиболее значимых факторов, оказывающих негативное воздействие на состояние, динамику, экологическое равновесие лесных фитоценозов и причиняющих лесному хозяйству значительный материальный и экологический ущерб.

Лесные насаждения Республики Беларусь в силу своего возрастного и породного состава, сильного антропогенного воздействия потенциально пожароопасны (более 70% лесов отнесены к наиболее пожароопасным I–III классам природной пожарной опасности) [1]. Так, за 2022 г. в лесном фонде произошло 593 лесных пожара общей площадью 454,7 га, средняя площадь пожара составила 0,77 га [2].

Одним из наиболее эффективных инструментов по минимизации ущерба от лесного пожара является оперативное принятие мер для ликвидации возгораний на основании прогноза его развития.

Математическое моделирование лесных пожаров является одной из самых сложных областей моделирования в силу многообразия и сложности физических процессов, протекающих в зоне пожара и в атмосфере над пожаром, а также из-за влияния погодных условий, возможного распространения пожара на большой площади и других факторов [3, 4].

Конечной целью проведения исследований и разработок базы данных характеристик лесных пожаров является разработка методических рекомендаций по прогнозированию их развития с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий, определяющих порядок моделирования развития поверхностных пожаров, возникающих на территории земель лесного фонда. В основу разработки положена

концепция эллиптической модели распространения лесного пожара, расположение и размеры которой определяются в зависимости от лесоводственно-таксационных характеристик лесных насаждений по данным лесоустройства и метеорологических показателей, определяемых по ближайшей к зарегистрированному возгоранию метеостанции. Определение координат потенциальных возгораний на территории лесного фонда предусматривается на основе использования метеорологических космических аппаратов.

Основная часть. Первым этапом при разработке методики прогнозирования распространения лесных пожаров является сбор материалов о фактических возгораниях в лесном фонде и создание на их основе базы данных характеристик лесных пожаров.

База данных должна стать информационной платформой разработки и совершенствования методических рекомендаций прогнозирования развития лесных пожаров и формируется с целью создания моделей развития лесных пожаров и повышения их прогностической точности.

Основными требованиями, предъявляемыми к создаваемой базе данных характеристик лесных пожаров, являются: содержание показателей, оказывающих влияние на скорость распространения лесных пожаров; возможность непосредственного определения используемых показателей по данным лесохозяйственных учреждений, лесоустройства, метеорологических станций, а также измерений в полевых условиях; наращивание объемов данных путем добавления показателей новых лесных пожаров.

На этапе подготовительных работ был проведен анализ всей имеющейся информации о

лесных пожарах из отчетности Министерства по чрезвычайным ситуациям и Министерства лесного хозяйства РБ. Дополнительно использовались данные о тепловых аномалиях, зафиксированных космическими летательными аппаратами (MODIS и др.) [5, 6]. На основании этих данных за период 2018–2022 гг. был подготовлен точечный векторный слой, с помощью которого подбирались объекты для проведения полевых исследований (рис. 1). Проведенный анализ картографических материалов выявил лесохозяйственные учреждения, на территории которых наиболее целесообразно проводить полевые исследования по сбору экспериментальных данных.

В лесхозах изучались книги учета и акты о лесных пожарах, на основании которых собрана информация по адресной привязке зарегистрированных пожаров (лесничество, квартал, выдел), а также данные о виде пожара, дате и времени его обнаружения, времени начала тушения пожара и его ликвидации. Эти данные легли в основу списка объектов для полевых исследований.

Для каждого лесхоза в геоинформационной системе QGIS готовился отдельный проект, который включал векторные лесные карты и атри-

бутивные данные с поведельной характеристикой таксационных выделов [7]. С целью использования в полевых исследованиях все проекты сохранялись в памяти мобильных устройств и через приложения QField применялись для поиска затронутых пожарами лесных насаждений на местности [8]. Пример сформированной карты, используемой для поиска объектов и проведения полевых исследований, представлен на рис. 2.

При проведении полевых обследований границы мест возникновения лесных пожаров легко опознаваемы по следам нагара на стволах хвойных пород, сохраняющимся до 4 лет. В большинстве случаев границы лесных пожаров запахивались плугом ПКЛ-70, что упрощало их установление.

Для точного картографирования границ лесных пожаров использовался GNSS приемник Triumph-2 [9]. Картирование проводилось в кинематическом режиме с интервалом записи данных 1 с (рис. 3).

Эти фотографии позволили уточнить характеристику горючих материалов на участках, пройденных лесными пожарами, для их дальнейшей классификации.

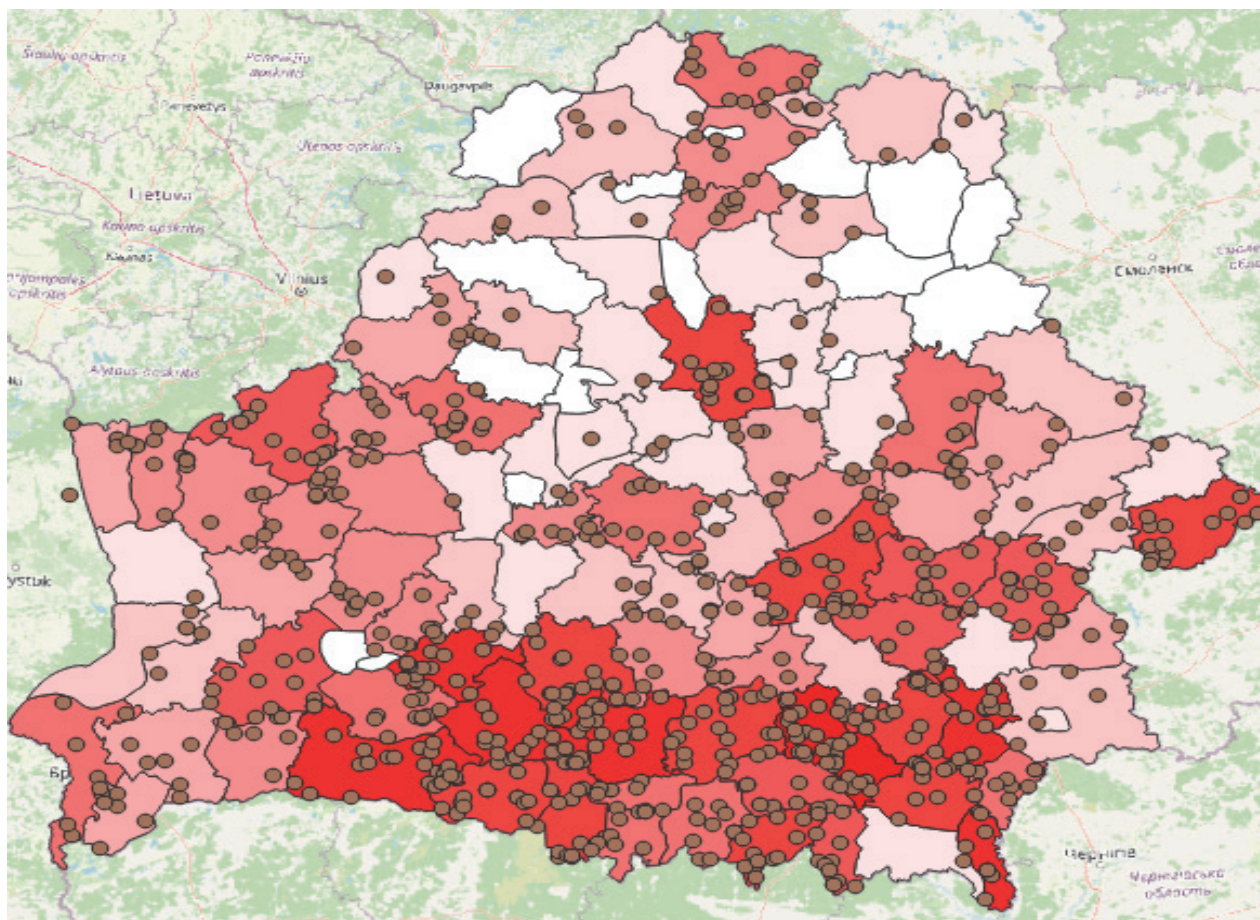


Рис. 1. Тематическая карта государственных лесохозяйственных учреждений по количеству зафиксированных на их территории лесных пожаров (за 2018–2022 гг.)



Рис. 2. Фрагмент карты полевых исследований на территории Бобруйского лесхоза

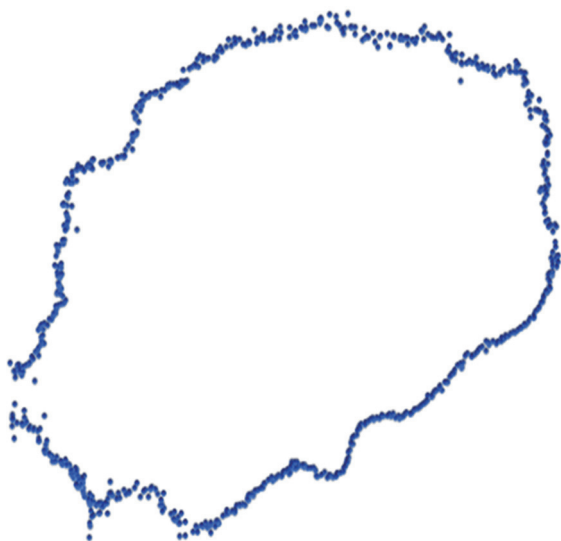


Рис. 3. Точечный векторный слой границ лесного пожара, снятый приемником Triumph-2

Каждый контур лесного пожара записывался в отдельный файл и при дальнейшей обработке в QGIS формировались полигональные объекты всех обследуемых лесных пожаров.

Также при проведении полевых исследований проводилась фотосъемка последствий лесных пожаров с привязкой к геопространственной основе и последующее создание проектов в QGIS (рис. 4).

В процессе полевых работ проведено обследование и картирование границ пожаров в лесных насаждениях разного возраста, породного состава и типов условий местопроизрастания.

Вся собранная полевая информация была обработана и помещена в базу данных характеристик лесных пожаров.



Рис. 4. Последствия низового пожара в средневозрастном сосновом насаждении

Таким образом, были подготовлены материалы и проведены полевые изыскания на территории 10 лесохозяйственных учреждений, подведомственных Министерству лесного хозяйства Республики Беларусь: Бобруйского, Борисовского, Вилейского, Воложинского, Любанского, Пуховичского, Стародорожского, Столбцовского, Старобинского и Червеньского лесхозов.

Подготовленная на основании собранной информации база данных состоит из следующих информационных компонентов (рис. 5):

- метеорологические данные;
- лесоводственно-таксационные данные;
- общие данные о лесном пожаре.

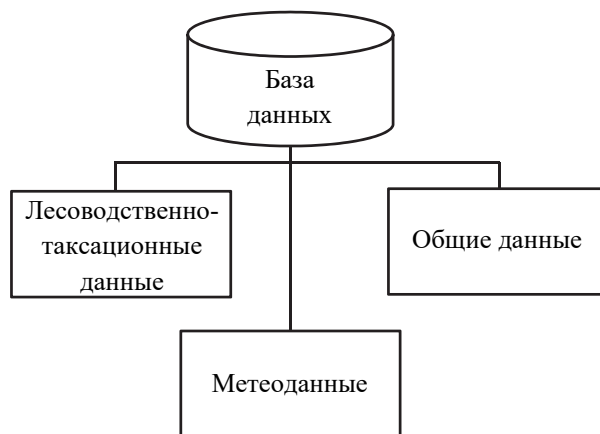


Рис. 5. Схема информационных компонентов базы данных лесных пожаров

Метеорологические данные, вносимые в базу, отбирались на основании даты и времени возникновения и ликвидации лесного пожара по информации, которая регистрировалась ближайшей к лесному пожару метеостанцией [10, 11] и определялась на основании пространственного анализа. На начальном этапе обработки собранных данных проводился корреляционный анализ, в результате которого были отобраны показатели, имеющие наибольшее влияние на скорость распространения фронта пожара:

- скорость ветра;
- направление ветра (румб направления, откуда дует ветер);
- температура воздуха;
- относительная влажность воздуха;
- накопленное количество осадков за сутки;
- дата схода снежного покрова.

Скорость ветра определяет соотношение сторон эллипса, в форме которого планируется моделировать распространение лесного пожара. Также при распространении пожара на открытых участках скорость ветра имеет на него прямое влияние, что подтверждается высокими значениями коэффициента корреляции при статистическом анализе.

Направление ветра используется для определения размещения эллипса лесного пожара в пространстве. Длинная ось эллипса размещается по направлению ветра.

Остальные метеорологические показатели используются для определения индекса влажности топлива. Он представляет собой влажность подстилки и других видов топлива и оценивает относительную легкость воспламенения и воспламеняемость топлива в полдень [12].

Лесоводственно-таксационные данные, которые заносятся в создаваемую базу данных, включают лесоводственно-таксационную характеристику лесных насаждений, затронутых лесными пожарами. Выделы определялись на основании оверлейных операций при наложении контура лесного пожара на слой лесотаксационных выделов. Далее устанавливалась доля каждого выдела в общей площади лесного пожара. Для каждого выдела, затронутого пожаром, из лесоустроительных данных в базу записывались следующие показатели:

- вид земель;
- преобладающая порода;
- коэффициент состава преобладающей породы;
- возраст.

Для контроля собранных данных перечисленные таксационные показатели уточнялись при натурном обследовании пожарищ, так как они определяют качественные и количественные характеристики лесных горючих материалов [13–15].

Вид земель участка, на котором произошел лесной пожар, используется для его отнесения к покрытым и не покрытым лесом землям. Вид зе-

мель определяет механизм влияния ветра на скорость распространения пожара на открытых и закрытых участках местности.

В пределах покрытых лесом земель на основании преобладающей породы, коэффициента состава и возраста вносимые в базу данных насаждения классифицируются по группе накопленных в них горючих материалов.

В результате предварительного анализа собранных экспериментальных данных было выделено 10 категорий объектов моделирования, для которых существует статистическое различие в топливных ресурсах и влиянии метеорологических показателей на скорость распространения лесного пожара:

- сосновые молодняки весной и осенью (до 20 лет);
- сосновые молодняки летом (до 20 лет);
- сосновые насаждения весной и осенью (20 лет и старше);
- сосновые насаждения летом (20 лет и старше);
- еловые насаждения весной и осенью;
- еловые насаждения летом;
- лиственные лесные насаждения весной и осенью;
- лиственные лесные насаждения летом;
- не покрытые лесом земли (вырубки, прогадины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) весной и осенью;
- не покрытые лесом земли (вырубки, прогадины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) летом.

Также для определения возможных препятствий развития лесного пожара как естественного, так и искусственного происхождения предусматривается использование векторных картографических слоев, отображающих размещение квартальных просек, дорог, рек, ручьев, каналов, противопожарных разрывов и минерализованных полос.

Общие данные о лесном пожаре – это характеристики пожара, используемые для расчета его фактической скорости. Они включают следующие показатели (таблица):

- дата возникновения пожара;
- площадь лесного пожара на начало тушения;
- площадь лесного пожара на момент ликвидации;
- время начала тушения;
- время ликвидации;
- отношение осей эллипса;
- расстояние, пройденное лесным пожаром с момента возгорания до начала тушения (длина большей полуоси эллипса пожара на момент начала тушения);
- расстояние, пройденное пожаром с момента возгорания до ликвидации (длина большей полуоси эллипса пожара на момент ликвидации);
- максимальная скорость фронта пожара.

Фрагмент данных об общих показателях лесных пожаров

Наименование лесхоза	Дата возникновения пожара	Время начала тушения	Время ликвидации	Длительность пожара, мин	Площадь пожара на начало тушения, га	Площадь пожара на момент ликвидации, га	Полуось эллипса ликвидации (a_2), м	Полуось эллипса ликвидации (b_2), м	Полуось эллипса начала тушения (a_1), м	Полуось эллипса начала тушения (b_1), м	Максимальная скорость пожара, м/мин	Доля выдела в площади пожара, %
1. Бобрыйский	01.07.19	13:30	14:10	40	0,2	0,5	44,71	35,61	28,28	22,52	0,33	0,25
2. Вилейский	06.08.20	14:20	17:10	170	0,5	1,8	75,71	75,71	39,90	39,90	0,21	0,32
3. Столбцовский	07.04.20	16:30	17:28	58	1,1	2,9	119,56	77,24	73,64	47,57	0,51	0,95
4. Любанский	28.03.20	13:51	14:33	42	0,2	0,2	28,28	22,52	28,28	22,52	0,00	1,00

На основании даты возникновения пожара определяется сезон: весна, осень или лето. Накопленный материал показывает, что при одних и тех же метеорологических показателях, и лесотаксационных характеристиках участка возгорания средняя скорость весеннего (осеннего) лесного пожара значительно выше этого показателя летом, что связано с наличием в летний период большого количества зеленой фитомассы, которая препятствует распространению огня. В весенний (осенний) период, наоборот, в лесном фонде скапливается большое количество горючих материалов, а полог древостоя становится более редким, что способствует проникновению ветра и увеличению скорости распространения огня.

Такие показатели, как площадь лесного пожара на начало тушения, площадь лесного пожара на момент ликвидации, время начала тушения, время ликвидации определялись на основании документации лесохозяйственных учреждений.

Отношение осей эллиптической модели распространения лесного пожара определяется на основании уравнения (1):

$$LB = 1,0 + 8,729 \cdot (1 - e^{-0,030 \cdot v^{2,155}}), \quad (1)$$

где LB – отношение большей оси эллипса к малой; v – скорость ветра, км/ч.

На основе значения скорости ветра, определяемой по ближайшей метеостанции, рассчитывается отношение большей оси эллипса к малой (LB). Полученное таким образом отношение осей заносится в базу данных как характеристика лесного пожара.

По данным о площади лесного пожара на момент начала тушения определяется значение большей полуоси эллипса на момент начала тушения лесного пожара. В формулу площади эллипса (2) подставляется значение большей полу-

оси (формула (4)), выраженное из формулы (3). В результате получается уравнение (5), из которого выражается значение малой полуоси эллиптической модели распространения лесного пожара (формула (6)):

$$S = \pi ab / 10\,000, \quad (2)$$

где S – площадь эллипса, га; a – длина большой полуоси, м; b – длина малой полуоси, м.

$$LB = a / b; \quad (3)$$

$$a = LB / b; \quad (4)$$

$$S = 2\pi bLB / 10\,000; \quad (5)$$

$$b = \sqrt{(10\,000 / \pi LB)}. \quad (6)$$

На основе значения малой полуоси с использованием уравнения (5) определяется значение большей полуоси, которое отражает расстояние, пройденное пожаром с момента возгорания до начала тушения (d_1).

По известной площади пожара на момент ликвидации таким же способом определяется значение большой полуоси эллипса ликвидации, которое является расстоянием, пройденным пожаром с момента возгорания до ликвидации (d_2). Рассчитанные значения расстояния, пройденного лесным пожаром, заносятся в базу данных характеристик лесных пожаров.

Скорость продвижения фронта пожара, рассчитанная только по данным, полученным в лесохозяйственных учреждениях на основании актов о лесных пожарах, будет иметь заниженное значение, поскольку в это время лесной пожар тушится и скорость его распространения снижается. Во избежание данной погрешности рассчитывается максимальная скорость распространения лесного пожара.

Для определения максимальной скорости используются элементы Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров CFFBPS [16]. Данная система прогнозирования была успешно адаптирована к условиям Российской Федерации сотрудниками Института космических исследований РАН [17].

Обследование пожарищ в натуре позволяет определить расстояния, пройденные пожаром, к моменту их обнаружения и к моменту ликвидации. Используя эти данные, можно определить параметры модели изменения скорости распространения пожара.

Общий вид данной модели можно представить уравнением (7):

$$ROS_t = ROS_{eq} (1 - e^{-at}), \quad (7)$$

где ROS_t – скорость распространения кромки пожара, км/ч; ROS_{eq} – максимально возможная скорость распространения пожара, км/ч; a – коэффициент, характеризующий темп увеличения скорости распространения пожара на начальном этапе его развития; t – время, прошедшее с момента возникновения пожара, мин.

Характер изменения скорости распространения пожара, представленный данным уравнением, предполагает быстрое увеличение скорости на начальном этапе и дальнейшее ее замедление. Затем скорость распространения пожара медленно увеличивается, асимптотически приближаясь к максимально возможному значению ROS_{eq} . Данная модель имеет два параметра. Первый (ROS_{eq}) представляет собой максимально возможную скорость распространения кромки пожара в данных условиях. Вторым параметром (a) характеризует темп увеличения скорости распространения пожара на начальном этапе его развития.

К сожалению, имеющихся данных по каждому из пожаров недостаточно для того, чтобы определить оба параметра уравнения (7). В прогнозной модели динамики природных пожаров CFFBPS для объектов горения с открытым пологом известные экспериментальные данные показывали, что максимальная скорость горения (90% от максимально возможной скорости распространения кромки пожара в данных конкретных условиях) достигалась за период времени, составляющий от 10 до 40 мин. В среднем этот период составлял 20 мин. В связи с этим для параметра a в модели (7) использовалось значение 0,115. Тогда при величине аргумента $t = 20$ мин (время, прошедшее с момента возникновения пожара) скорость распространения кромки пожара (ROS_t) будет составлять 90% от максимально возможной величины (ROS_{eq}).

Для объектов горения с закрытым пологом ситуация была сложнее, потому что в таких объ-

ектах первоначально возникающие низовые пожары могли через некоторое время переходить в верховые. Это приводило к тому, что динамика скорости распространения кромки пожара характеризовалась двойственностью, так как максимально возможная скорость распространения низового и верхового пожаров разная. В результате время, необходимое для достижения максимально возможной скорости распространения пожара, было больше, чем для объектов с открытым пологом, и характеризовалось более высокой изменчивостью.

В Беларуси подавляющее большинство пожаров низовые, и данные, на основе которых проводятся исследования, относятся преимущественно к низовым пожарам. В связи с этим при настройке модели (7) на конкретные объекты использовалось значение параметра $a = 0,115$.

Для определения величины второго параметра (ROS_{eq}) с помощью уравнения (7) получим выражение для расстояния, пройденного кромкой пожара за период времени t от момента возгорания. Для этого надо найти определенный интеграл от скорости распространения кромки пожара в интервале времени от 0 до t :

$$\begin{aligned} D_t &= \int_0^t (ROS_z) dz = \int_0^t ROS_{eq} (1 - e^{-az}) dz = \\ &= ROS_{eq} \left(t + \frac{e^{-at}}{a} \right) - ROS_{eq} \left(0 + \frac{e^{-a \cdot 0}}{a} \right) = \\ &= ROS_{eq} \left(t + \frac{e^{-at}}{a} - \frac{1}{a} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

где D_t – расстояние, пройденное пожаром за период времени t , прошедший от момента возгорания, м.

Для каждого пожара, информация о котором заносится в базу данных, известно расстояние, пройденное кромкой пожара за время, прошедшее от его начала до момента обнаружения пожара (d_1) и от возникновения до прекращения горения (d_2). Подставляя эти значения в уравнение (9), получим систему уравнений:

$$\begin{cases} d_1 = ROS_{eq} \left(t_1 + \frac{e^{-at_1}}{a} - \frac{1}{a} \right), \\ d_2 = ROS_{eq} \left(t_2 + \frac{e^{-at_2}}{a} - \frac{1}{a} \right), \end{cases} \quad (9)$$

где t_1 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до момента его обнаружения, мин; t_2 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до момента его окончания, мин.

Разделив первое уравнение системы (9) на второе и учитывая, что период времени, прошедший от момента обнаружения пожара до прекращения горения, известен ($\Delta t = t_2 - t_1$), получим уравнение (10) с одним неизвестным t_1 :

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{t_1 + \frac{e^{-at_1}}{a} - \frac{1}{a}}{t_1 + \Delta t + \frac{e^{-a(t_1+\Delta t)}}{a} - \frac{1}{a}}, \quad (10)$$

где d_1 – расстояние, пройденное пожаром за время от возгорания до момента начала тушения, м; d_2 – расстояние, пройденное пожаром от возникновения до прекращения горения (ликвидации пожара), м; t_1 – время, прошедшее от момента возникновения пожара до момента его обнаружения (начала тушения), мин; a – параметр, равный 0,115, который приводит к тому, что при величине аргумента $t_1 = 20$ мин (время, прошедшее с момента возникновения пожара) скорость его распространения будет составлять 90% от максимально возможной величины; Δt – период времени, прошедший от момента обнаружения пожара до прекращения горения (ликвидации пожара), мин.

Таким образом, для каждого пожара, информация о котором заносится в базу данных, решалось уравнение (10) методом половинного деления [18]. Значение t_1 определялось с точностью до 30 с.

Выразив максимально возможную скорость распространения кромки пожара из первого уравнения системы (9), получим формулу (11) для вычисления параметра (ROS_{eq}):

$$ROS_{eq} = \frac{d_1}{t_1 + \frac{e^{-at_1}}{a} - \frac{1}{a}}, \quad (11)$$

С помощью уравнения (11) максимальная скорость распространения лесного пожара (ROS_{eq})

вычислялась для всех объектов, включаемых в базу данных характеристик лесных пожаров.

Расчитанные значения максимальной скорости распространения пожара (ROS_{eq}) вносятся в базу данных как общие показатели лесного пожара и в последующем используются при моделировании его скорости распространения.

Заключение. На данном этапе исследований проведены полевые изыскания и подготовлены экспериментальные данные по характеристике лесных пожаров, на основании которых создана база данных. Данная база будет использована в дальнейших исследованиях для проведения статистического анализа зависимости скорости распространения лесных пожаров от лесоводственно-таксационных и метеорологических показателей, которые лягут в основу алгоритмов расчета скорости распространения лесного пожара и определения параметров эллиптической модели его развития.

Подготовленная база данных включает в себя характеристику 101 лесного пожара, произошедшего в лесном фонде Республики Беларусь за 2018–2022 гг.

С целью повышения точности прогнозирования развития лесных пожаров целесообразно предусматривать совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах. Данный подход позволит постоянно увеличивать точность пространственно-временного моделирования возможного развития лесных пожаров.

Список литературы

1. Совершенствование мероприятий по противопожарному обустройству лесного фонда Республики Беларусь / В. В. Усеня [и др.] // Вестник Института инженеров управления МЧС Республики Беларусь. 2007. № 5 (1). С. 40–46.
2. Александр Драгун – о готовности лесхозов к пожароопасному сезону и роли населения в предотвращении лесных пожаров // Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <https://www.mlh.by/press-service/news/9825/> (дата обращения: 13.09.2023).
3. Рихтер И. Э. Лесная пирология с основами радиэкологии: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 1996. 290 с.
4. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
5. MeteoEye Hotspots – сервис обнаружения тепловых аномалий. URL: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (дата обращения: 12.09.2023).
6. Карта пожаров: Продвинутая платформа для оперативного спутникового мониторинга пожаров. URL: <https://fires.ru/> (дата обращения: 12.09.2023).
7. Краткое введение в ГИС // QGIS Documentation. URL: https://docs.qgis.org/3.4/ru/docs/gentle_gis_introduction/vector_attribute_data.html (дата обращения: 27.08.2023).
8. QField: приложение. URL: <https://qfield.org/> (дата обращения: 13.09.2023).
9. Триумф-2 // JAVAD. URL: <https://www.javad.com/jgnss/products/receivers/triumph-2.html> (дата обращения: 12.09.2023).
10. Погода в 243 странах мира // Расписание Погоды. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 18.08.2023).
11. Леонович И. И. Метеорологические станции Республики Беларусь. Минск: БНТУ, 2013. 137 с.

12. Background Information // Canadian Wildland Fire Information System. URL: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi?wbdisable=true#:~:text=The%20Fine%20Fuel%20Moisture%20Code,the%20flammability%20of%20fine%20fuel> (дата обращения: 13.09.2023).

13. Технические указания по заполнению карточек таксации при таксации леса. Минск: Белгослес, 2019. 125 с.

14. Справочник таксатора / В. С. Мирошников [и др.]. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.

15. Юркевич И. Д., Гельтман В. С. География, типология и районирование лесной растительности Беларуси. Минск: Наука и техника, 1965. 288 с.

16. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3. Ottawa: Canadian Department of Forestry, 1992. 63 p.

17. Региональная оптимизация параметров прогнозной модели природных пожаров и оперативное моделирование динамики их развития с использованием данных спутниковых наблюдений / С. А. Хвостиков [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 3. С. 91–98.

18. Заварыкин В. М., Житомирский В. Г., Лапчик М. П. Численные методы. М.: Просвещение, 1990. 176 с.

References

1. Usenya V. V., Lasuta G. F., Kasperov G. I., Goman P. N. Improving measures for fire prevention in the forest fund of the Republic of Belarus. *Vestnik Instituta inzhenerov upravleniya MCHS Respubliki Belarus* [Bulletin of the Institute of Management Engineers of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus], 2007, no. 5 (1), pp. 40–46 (In Russian).

2. Alexander Dragun – on the readiness of forestry enterprises for the fire season and the role of the population in preventing forest fires. Available at: <https://www.mlh.by/press-service/news/9825/> (accessed 13.09.2023) (In Russian).

3. Rihter I. E. *Lesnaya pirologiya s osnovami radioekologii* [Forest pyrology with basics of radioecology]. Minsk, BSTU Publ., 1996. 290 p. (In Russian).

4. Grishin A. M. *Matematicheskoye modelirovaniye lesnykh pozharov i novyye sposoby bor'by s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new ways to combat them]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1992. 404 p. (In Russian).

5. MeteoEye Hotspots – service for detection of the thermal anomalies. Available at: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (accessed 12.09.2023) (In Russian).

6. Fire Map: an advanced platform for operational satellite monitoring of fires. Available at: <https://fires.ru/> (accessed 12.09.2023) (In Russian).

7. Brief introduction to GIS. Available at: https://docs.qgis.org/3.4/ru/docs/gentle_gis_introduction/vector_attribute_data.html (accessed 27.08.2023) (In Russian).

8. QField: Application. Available at: <https://qfield.org/> (accessed 13.09.2023) (In Russian).

9. Triumph-2. Available at: <https://www.javad.com/jgnss/products/receivers/triumph-2.html> (accessed 12.09.2023) (In Russian).

10. Weather in 243 countries. Available at: <https://rp5.ru> (accessed 18.08.2023) (In Russian).

11. Leonovich I. I. *Meteorologicheskiye stantsii Respubliki Belarus* [Meteorological stations of the Republic of Belarus]. Minsk, BNTU Publ., 2013. 137 p. (In Russian).

12. Background Information. Available at: <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi?wbdisable=true#:~:text=The%20Fine%20Fuel%20Moisture%20Code,the%20flammability%20of%20fine%20fuel> (accessed 13.09.2023).

13. *Tekhnicheskoye ukazaniya po zapolneniyu kartochek taksatsii pri taksatsii lesa* [Technical instructions for filling out taxation cards for forest taxation]. Belgosles Publ., 2019. 125 p. (In Russian).

14. Miroshnikov V. S., Trull O. A., Yermakov V. E., Dol'skiy L. V., Kostenko A. G. *Spravochnik takstatora* [Taxi driver's directory]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p. (In Russian).

15. Yurkevich I. D., Gel'tman V. S. *Geografiya, tipologiya i rayonirovaniye lesnoy rastitel'nosti Belarusi* [Geography, typology and zoning of forest vegetation in Belarus]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1965. 288 p. (In Russian).

16. Forestry Canada Fire Danger Group. Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Information Report ST-X-3. Ottawa, Canadian Department of Forestry, 1992. 63 p.

17. Khvostikov S. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Loupian E. A. Regional optimization of the parameters of a forecast model of wildfires and operational modeling of the dynamics of their development using satellite observation data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, vol. 9, no. 3, pp. 91–98 (In Russian).

18. Zavarykin V. M., Zhitomirskiy V. G., Lapchik M. P. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Prosveshcheniye Publ., 1990. 176 p. (In Russian).

Информация об авторах

Пушкин Андрей Александрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: pushkin@belstu.by

Коцан Владимир Васильевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: Wolodia250@belstu.by

Машковский Владимир Петрович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, старший научный сотрудник кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: mashkovsky@belstu.by

Сидельник Николай Ярославович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sidelnik@belstu.by

Сеvрук Павел Владимирович – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: sevrupkv@belstu.by

Information about the authors

Pushkin Andrey Aleksandrovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Head of the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pushkin@belstu.by

Kotsan Vladimir Vasil'evich – PhD Agriculture, Associate Professor, Assistant Professor, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Wolodia250@belstu.by

Mashkovsky Vladimir Petrovich – PhD (Agriculture), Associate Professor, Senior Researcher, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mashkovsky@belstu.by

Sidelnik Nikolai Yaroslavovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sidelnik@belstu.by

Sevrup Pavel Vladimirovich – PhD (Agriculture), Senior Lecturer, the Department of Forest Inventory. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sevrupkv@belstu.by

Поступила 15.10.2023