

# 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, И. В. Толкач, Н. Я. Сидельник, П. В. Севрук**  
Белорусский государственный технологический университет

### МЕТОДИКА ПРОГНОЗА РАЗВИТИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

В статье описан алгоритм моделирования низовых лесных пожаров, который является основой методических рекомендаций по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий. Алгоритм разработан на основании материалов о местах фактических возгораний, обследованных в натуре. Детальная характеристика лесных пожаров, произошедших в лесном фонде Республики Беларусь за период 2018–2022 гг. собрана в базу данных. Разработанный алгоритм моделирования состоит из трех этапов: определение влажности горючих материалов на основании фактических метеорологических условий, установление скорости лесного пожара в зависимости от пирологической характеристики горючих материалов и метеоусловий, определение параметров и построение эллиптической модели распространения лесного пожара. В основании представленного алгоритма лежит принцип Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров с доработками авторов статьи и адаптацией к условиям Республики Беларусь. На основании методических рекомендаций разработан программный комплекс, который моделирует графическое представление развития лесного пожара на геопространственной основе. Дальнейшее совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах, позволит повысить точность пространственно-временного моделирования возможного развития лесных пожаров.

**Ключевые слова:** лесной пожар, математическая модель, метеорологические показатели, индекс влажности горючих материалов, лесоводственно-таксационные показатели, эллиптическая модель, программный комплекс.

**Для цитирования:** Пушкин А. А., Коцан В. В., Толкач И. В., Сидельник Н. Я., Севрук П. В. Методика прогноза развития лесных пожаров на основе геоинформационных систем // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хоз-во, природопользование и перераб. возобновляемых ресурсов. 2025. № 1 (288). С. 5–14.

DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-1.

**A. A. Pushkin, V. V. Kotsan, I. V. Tolkach, N. Ya. Sidelnik, P. V. Sevruk**  
Belarusian State Technological University

### THE METHODOLOGY FOR FORECASTING THE PROGRESSION OF FOREST FIRES BASED ON GEOINFORMATION SYSTEMS

The algorithm for modeling low forest fires, which is the basis of the methodological recommendations for forecasting the progression of forest fires, taking into account data on the state of forest areas and meteorological conditions are describes in this article. The algorithm was developed on the basis of materials on the locations of the real ignitions, examined in nature. The detailed description of the forest fires that occurred in the forest fund of the Republic of Belarus for the period 2018–2022 has been collected into the database. The developed modeling algorithm consists of three stages: determination of the

moisture fuel based on factual meteorological conditions, determination of the speed of the forest fire depending on the pyrological characteristics of the fuel and weather conditions, and determination of parameters and parameters of the elliptical model of the forest fire spread. The presented algorithm is based on the principle of the Canadian forecast model of forest fire dynamics with modifications by the authors of the article and adaptation to the conditions of the Republic of Belarus. Based on the methodological recommendations, the software package has been developed that simulates a graphical representation of the progression of the forest fire on the geospatial basis. Further improvement of computational algorithms, taking into account subsequent updates of the database, which includes new information about fires occurring in the forest fund, will increase the accuracy of the spatial-temporal modeling of the possible progression of forest fires.

**Keywords:** forest fire, mathematical model, meteorological indicators, fuel moisture index, forestry-taxation stands characteristics, elliptical model, software package.

**For citation:** Pushkin A. A., Kotsan V. V., Tolkach I. V., Sidelnik N. Ya., Sevruc P. V. The methodology for forecasting the progression of forest fires based on geoinformation systems. *Proceedings of BSTU, issue 1, Forestry. Nature Management. Processing of Renewable Resources*, 2025, no. 1 (288), pp. 5–14 (In Russian). DOI: 10.52065/2519-402X-2025-288-1.

**Введение.** Лесные пожары из года в год остаются актуальной проблемой не только в Беларуси, но и за ее пределами. Существует ряд причин, по которым они возникают, начиная с выжигания сухой растительности ранней весной и заканчивая умышленными поджогами. Аномально жаркая погода в последние годы только усугубляет сложившуюся ситуацию [1, 2]. По состоянию на 17 сентября за 2024 г. произошло 363 лесных пожара общей площадью 260 га, средняя площадь возгорания составила 0,72 га [3]. Поэтому вопрос прогнозирования распространения лесного пожара остается актуальным.

В существующей на территории нашей страны пожароопасной ситуации в дополнение к быстрому обнаружению лесного пожара еще одним эффективным инструментом по минимизации ущерба является быстрый прогноз динамики пожара для оперативного принятия мер по его ликвидации на основании существующих погодных и лесоводственно-таксационных показателей насаждений.

Прогноз динамики развития лесного пожара строится на основании математического моделирования и является сложным процессом. На процесс горения влияют погодные условия в момент возгорания и погода предшествующего периода, а также пирологическая характеристика лесного насаждения.

Конечной целью исследований является разработка программного комплекса «Моделирование лесного пожара», который должен решать следующие задачи: расчет характеристик лесного пожара, динамики его развития и графическое представление модели развития лесного пожара на геопространственной основе в границах Республики Беларусь. Определение координат возгораний на территории лесного фонда происходит на основе зарегистрированных температурных аномалий, данных видеонаблюдения и авиапатрулирования. Расположение и размеры лесного

пожара должны моделироваться в зависимости от лесоводственно-таксационных характеристик лесных насаждений, определяемых по данным лесоустройства, и метеорологических показателей ближайшей к зарегистрированному возгоранию метеостанции. Для этих целей были разработаны методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий.

**Основная часть.** Общая схема моделирования. На предыдущих этапах исследований была собрана информация о пожарах, произошедших в лесном фонде. Их характеристика, состоящая из следующих информационных компонентов: метеорологические, лесоводственно-таксационные и общие данные о лесном пожаре, была занесена в разработанную базу данных [4]. На основании этих материалов были разработаны методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий [5]. Данные методические рекомендации легли в основу разработки программного комплекса «Моделирование лесного пожара», который планируется использовать в Республиканском центре управления и реагирования на чрезвычайные ситуации с целью прогнозирования развития лесных пожаров.

В данной статье представлен алгоритм расчета показателей, необходимых для моделирования развития контура лесного пожара на основе лесоводственно-таксационной характеристики выдела [6–8], в котором возникло возгорание, и метеорологических данных [9, 10] в момент его возникновения. На основании этих значений рассчитывается максимальная скорость продвижения фронта пожара и определяются параметры его контура и положение в двухмерном пространстве. Общая схема прогнозирования развития лесного пожара представлена на рис. 1.



Рис. 1. Схема моделирования развития лесного пожара

С использованием векторного слоя таксационных выделов на основе координат точки возгорания [11, 12] определяется лесоводственно-таксационная характеристика насаждения в выделе, затронутом пожаром. Также учитывается характеристика соседних выделов в радиусе 56 м. Данное расстояние соответствует радиусу круга площадью 1 га (средняя площадь лесных пожаров за последние годы).

На первом временном промежутке моделирования используется таксационная характеристика выдела, в котором он обнаружен.

После определения контура пожара через заданный промежуток времени (30 мин) проводится пространственный анализ для определения соседних выделов, которые могут быть затронуты возникшим лесным пожаром. На втором временном промежутке моделирования для каждого узла эллипса используется таксационная характеристика выдела, в котором он находится. Таким образом, после каждого последующего этапа моделирования проводится пространственный анализ и определяются выделы, таксационная характеристика которых используется для расчета скорости фронта пожара. Также каждые 30 мин проводится анализ метеорологических показателей, влияющих на скорость и форму лесных пожаров. На протяжении каждого временного

промежутка моделирования принимается, что скорость и направление ветра постоянны, а огонь распространяется через один вид горючих материалов и не подвержен действиям по тушению.

Для целей моделирования распространения лесного пожара используется эллиптическая модель его развития, которая позволяет определить его размер и положение на основе дальности распространения пожара и скорости ветра [13, 14].

В основании представленного алгоритма лежит принцип Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров [15, 16] с доработками авторов статьи и адаптацией к условиям Республики Беларусь.

**Методика определения индекса влажности горючих материалов.** На основании анализа литературных источников [17, 18] и собранных полевых данных было определено, что самое большое влияние на скорость распространения лесного пожара оказывает влажность горючих материалов, находящихся в лесных насаждениях.

Индекс влажности горючих материалов (FFMC) представляет влажность подстилки и других видов горючих материалов и оценивает его воспламеняемость в полдень каждого дня. Методика расчета данного показателя представлена уравнениями (1)–(13).

Для определения индекса влажности горючих материалов на текущий день необходимо знать его значение на предыдущий день (первоначально после схода снежного покрова для него устанавливается значение 85). На основании значения индекса влажности горючих материалов в предыдущий день определяется содержание в нем влаги в этот день:

$$m_{t-1} = 147,2 \cdot \frac{101 - \text{FFMC}_{t-1}}{59,5 + \text{FFMC}_{t-1}}, \quad (1)$$

где  $m_{t-1}$  – влажность горючих материалов в предыдущий день;  $\text{FFMC}_{t-1}$  – индекс влажности горючих материалов в предыдущий день.

В случае дождя (количество осадков больше 0,5 мм) содержание влаги в горючих материалах в текущий день рассчитывается по формуле (2):

$$m_t = m_{t-1} + 42,5 \cdot P_f \cdot \left( \frac{-100}{e^{251 - m_{t-1}}} \right) \cdot \left( 1 - e^{\frac{-6,93}{P_f}} \right),$$

если  $m_{t-1} \leq 150$ ;

$$m_t = m_{t-1} + 42,5 \cdot P_f \cdot \left( \frac{-100}{e^{251 - m_{t-1}}} \right) \times$$

$$\times \left( 1 - e^{\frac{-6,93}{P_f}} \right) + 0,0015 \cdot (m_{t-1} - 150)^2 \cdot P_f^{0,5},$$

если  $m_{t-1} > 150$ ,

где  $m_t$  – влажность горючих материалов в текущий день;  $P_f$  – эффективное количество осадков, мм, которое рассчитывается по уравнению (3):

$$P_f = P - 0,5, \quad (3)$$

где  $P$  – количество осадков на открытом воздухе, измеренное 1 раз в полдень, мм. В случае если  $m_t > 250$ , то оно приравнивается к 250.

Если за прошедшие сутки осадков не наблюдалось, содержание влаги  $E_d$  в горючих материалах рассчитывается по уравнению (4):

$$E_d = 0,942 \cdot H_{12}^{0,679} + 11 \cdot e^{\frac{H_{12} - 100}{10}} +$$

$$+ 0,18 \cdot (21,1 - T_{12}) \cdot (1 - e^{-0,115 \cdot H_{12}}), \quad (4)$$

где  $H_{12}$  – относительная влажность воздуха в полдень, %;  $T_{12}$  – температура воздуха в полдень, °С.

Если  $E_d$  меньше, чем  $m_{t-1}$ , то скорость изменения влажности горючих материалов ( $k_d$ ) нужно рассчитывать по уравнениям (5) и (6):

$$k_0 = 0,424 \cdot \left( 1 - \left( \frac{H_{12}}{100} \right)^{1,7} \right) + 0,0694 \times$$

$$\times U_{12}^{0,5} \cdot \left( 1 - \left( \frac{H_{12}}{100} \right)^8 \right); \quad (5)$$

$$k_d = k_0 \cdot 0,581 \cdot e^{0,0365 \cdot T_{12}}, \quad (6)$$

где  $k_0$  – начальная скорость изменения влажности горючих материалов;  $U_{12}$  – скорость ветра в полдень, км/ч.

Тогда содержание влаги в горючих материалах рассчитывается по уравнению (7):

$$m_t = E_d + (m_{t-1} - E_d) \cdot 10^{-k_d}. \quad (7)$$

Если  $E_d$  больше, чем  $m_{t-1}$ , то необходимо рассчитать равновесную влажность мелкодисперсных горючих материалов ( $E_w$ ) по уравнению (8):

$$E_w = 0,618 \cdot H_{12}^{0,753} + 11 \cdot e^{\frac{H_{12} - 100}{10}} +$$

$$+ 0,18 \cdot (21,1 - T_{12}) \cdot (1 - e^{-0,115 \cdot H_{12}}). \quad (8)$$

Если  $E_w$  больше, чем  $m_{t-1}$ , то скорость изменения влажности горючих материалов рассчитывается по уравнениям (9) и (10):

$$k_0 = 0,424 \cdot \left( 1 - \left( \frac{100 - H_{12}}{100} \right)^{1,7} \right) +$$

$$+ 0,0694 \cdot U_{12}^{0,5} \cdot \left( 1 - \left( \frac{100 - H_{12}}{100} \right)^8 \right); \quad (9)$$

$$k_d = k_0 \cdot 0,581 \cdot e^{0,0365 \cdot T_{12}}. \quad (10)$$

Содержание влаги в горючих материалах в данном случае определяется по уравнениям (11) и (12):

$$m_t = E_d - (E_d - m_{t-1}) \cdot 10^{-k_d}; \quad (11)$$

$$\text{если } E_d \leq m_{t-1} \leq E_d, \text{ то } m_t = m_{t-1}. \quad (12)$$

После расчета влажности горючих материалов вычисляется индекс влажности горючих материалов для текущего дня по уравнению (13):

$$\text{FFMC}_t = 59,5 \cdot \frac{250 - m_t}{147,2 + m_t}. \quad (13)$$

В дальнейшем на основе значения индекса  $\text{FFMC}$  рассчитывается функция влажности горючих материалов  $f(F)$  по формулам (14) и (15):

$$f(F) = 91,9 \cdot e^{-0,1386 \cdot m_t} \cdot \left[ 1 + \frac{m_t^{5,31}}{4,93 + 10^7} \right]; \quad (14)$$

$$m_t = \frac{147,2 \cdot (101 - \text{FFMC}_t)}{59,5 + \text{FFMC}_t}. \quad (15)$$

Помимо влажности горючих материалов на скорость распространения пожара значительное влияние оказывает ветер. В этой связи

рассчитывается значение функции влияния ветра  $f(W)$  по формулам (16) и (17):

$$f(W) = e^{0,05039 \cdot WS},$$

если  $WS \leq 40$  км/ч; (16)

$$f(W) = 12 \cdot \left[ 1 - e^{-0,0818 \cdot (WS - 28)} \right],$$

если  $WS > 40$  км/ч, (17)

где  $WS$  – скорость ветра, км/ч.

С использованием значений, полученных из функций (14), (16), (17), определяется начальный индекс распространения пожара  $ISI$  на основании уравнения (18):

$$ISI = 0,208 \cdot f(W) \cdot f(F). \quad (18)$$

На основании известного значения начального индекса распространения пожара определяется скорость его распространения.

**Методика определения скорости лесного пожара.** Одним из основных показателей в процессе моделирования лесного пожара является его скорость. При анализе фактических возгораний было определено, что покрытые и не покрытые лесом площади имеют различные механизмы протекания пожара, поэтому ниже описаны две методики для расчета скорости распространения лесного пожара.

*Покрытые лесом площади* представлены насаждениями естественного происхождения и лесными культурами хвойных и лиственных древесных пород.

Для расчета скорости распространения фронта пожара на покрытых лесом площадях используются данные, полученные при проведении анализа сформированного ранее массива характеристик лесных пожаров [4]:

$$ROS_{eq} = a \cdot \left( 1 - e^{-b \cdot ISI} \right)^c, \quad (19)$$

где  $ROS_{eq}$  – максимальная скорость распространения пожара, м/мин;  $ISI$  – начальный индекс распространения пожара;  $a, b, c$  – свободные члены модели, которые зависят от типа горючих материалов и сезона.

Для условий Республики Беларусь авторами были рассчитаны значения свободных членов модели для различных видов горючих материалов и сезонов года.

Поскольку скорость распространения лесного пожара различается в зависимости от вида лесных земель и растительности, то ее моделирование осуществляется по следующим расчетным группам:

- сосновые молодняки весной и осенью (возраст <20 лет);
- сосновые молодняки летом (возраст <20 лет);
- сосновые насаждения весной и осенью (возраст  $\geq 20$  лет);

- сосновые насаждения летом (возраст  $\geq 20$  лет);
- еловые насаждения весной и осенью;
- еловые насаждения летом;
- лиственные насаждения весной и осенью;
- лиственные насаждения летом.

Максимальная скорость, получаемая из уравнения (19), является максимально возможной скоростью распространения кромки пожара в данных условиях. Во время проведения сбора данных о реальных возгораниях в лесном фонде для каждого обследованного лесного пожара было рассчитано значение максимально возможной скорости по алгоритму, описанному в предыдущих публикациях [4]. Определение рассчитанных значений свободных членов модели проводилось на основании данного показателя.

В смешанных насаждениях, где в состав древостоя входят хвойные и лиственные породы, расчет скорости производится по формуле (20):

$$ROS_{eq} = \left( \frac{PC}{100} \cdot ROS_C \right) + \left( \frac{PH}{100} \cdot ROS_H \right), \quad (20)$$

где  $ROS_{eq}$  – максимальная скорость пожара, м/мин;  $PC$  – коэффициент участия в составе хвойных;  $ROS_C$  – максимальная скорость распространения пожара в хвойных древостоях, м/мин;  $PH$  – доля в составе лиственных;  $ROS_H$  – максимальная скорость распространения пожара в лиственных древостоях, м/мин.

*Не покрытые лесом и нелесные площади*, на которых моделируется распространение пожара, представлены следующими видами земель: вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота. Перечисленные виды земель лесного фонда несколько различаются по количеству и характеристикам лесных горючих материалов, однако для целей моделирования распространения лесного пожара, упрощения алгоритмизации вычислительного процесса они обобщаются в одну группу с усредненными пирологическими характеристиками.

На основании известного значения начального индекса распространения пожара  $ISI$  определяется скорость распространения низового пожара на не покрытых лесом и нелесных площадях по формуле (21):

$$ROS_{eq} = a \cdot \left( 1 - e^{-b \cdot ISI} \right)^c \cdot CF, \quad (21)$$

где  $CF$  – коэффициент высыхания травянистой растительности.

Свободные члены модели  $a, b, c$  для не покрытых лесом и нелесных площадей рассчитаны для условий Беларуси по следующим расчетным группам:

- не покрытые лесом земли (вырубки, прогалины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) весной и осенью;

– не покрытые лесом земли (вырубки, прогадины, несомкнувшиеся лесные культуры, болота) летом.

Коэффициент высыхания травянистой растительности определяется по формуле (22):

$$CF = 0,02 \cdot C - 1, \text{ если } C > 50\%;$$

$$CF = 0, \text{ если } C \leq 50\%, \quad (22)$$

где  $C$  – степень высыхания травянисто-кустарниковой растительности, %.

Для автоматического определения степени высыхания травянисто-кустарниковой растительности используются ежедневные значения индекса NDVI, который устанавливается по материалам космической съемки. Если значение  $NDVI > 0,3$ , то  $C = 50\%$ , если  $NDVI < 0$ , то  $C = 100\%$ , если  $0 < NDVI < 0,3$ , то  $C$  определяется по формуле (23):

$$C = -166,6665 \cdot NDVI + 100. \quad (23)$$

Рассчитанная таким образом скорость используется при построении эллиптической модели распространения пожара на следующих этапах моделирования.

**Методика определения параметров эллиптической модели лесного пожара.** Общая форма лесного пожара, возникающего из единственного источника возгорания, главным образом зависит от скорости и направления ветра. При условии, что направление ветра относительно постоянно, пожары обычно принимают примерно эллиптическую форму. Фундаментальным свойством пожара эллиптической формы является отношение длинной оси эллипса к короткой. Данное отношение определяет форму эллипса, которая может быть, как сильно вытянутой вдоль длинной оси, так и почти круглой. С целью определения данного

отношения используются элементы Канадской прогнозной модели динамики лесных пожаров CFFBPS (Canadian Forest Fire Behavior Prediction System) [9], а именно уравнение (24):

$$LB = 1,0 + 8,729 \cdot (1 - e^{-0,030 \cdot WS})^{2,155}, \quad (24)$$

где  $LB$  – отношение длинной оси эллипса к короткой.

При скорости ветра, равной нулю, в гомогенной среде пожар распространяется равномерно во все стороны от исходной точки возгорания, и соотношение его осей равно 1. В этом случае контур пожара будет иметь форму круга (рис. 2).

При наличии ветра пожар будет более интенсивно распространяться по его направлению, т. е. вытягиваться по направлению ветра. Распространение по флангам будет менее интенсивным, а в тыл крайне малым. На основании этого в разработанных рекомендациях движением пожара против ветра в тыл пренебрегли. Чем выше скорость ветра, тем соотношение осей пожара больше, поскольку ветер затрудняет распространение огня назад и в стороны, а направляет его вперед. В результате контур пожара приобретает форму эллипса (рис. 3).

Для построения эллипса распространения лесного пожара необходимо знать точку очага возгорания, протяженность короткой и длинной осей эллипса.

Для получения графического представления модели развития лесного пожара на геопространственной основе в границах Республики Беларусь проводятся следующие операции. По координатам точки обнаруженного или предполагаемого возгорания определяется таксационный выдел, на территорию которого попадает данная точка.

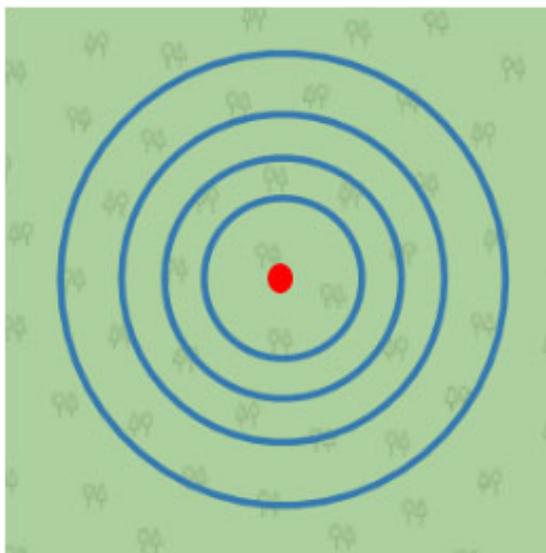


Рис. 2. Распространение лесного пожара с течением времени в гомогенной среде при отсутствии ветра

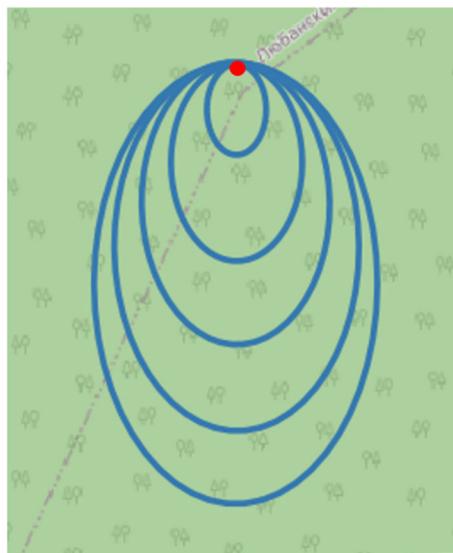


Рис. 3. Распространение лесного пожара с течением времени в гомогенной среде при наличии ветра

С учетом метеорологических данных на момент обнаружения пожара и лесоводственно-таксационных данных выдела рассчитывается максимальная скорость распространения фронта низового лесного пожара.

На основании полученной максимальной скорости распространения фронта пожара определяется положение и размеры эллиптической модели распространения лесного пожара.

Для правильного размещения эллипса в пространстве используется информация о направлении ветра (румб стороны света, с которого дует ветер), на основании которой определяется направление распространения фронта пожара в виде азимута от точки возгорания. В этом направлении будет располагаться длинная ось эллипса.

Для построения контура лесного пожара в форме эллипса необходимо определить значения его длинной и короткой осей.

На основании рассчитанной максимальной скорости в определенный момент времени и период прогноза по формуле (25) вычисляется расстояние, пройденное фронтом пожара по направлению ветра:

$$l_i = t \cdot ROS_{eq i}, \quad (25)$$

где  $l_i$  – расстояние, пройденное фронтом пожара по направлению ветра, м;  $t$  – период времени прогноза, с;  $ROS_{eq i}$  – максимальная скорость в определенный момент времени, м/с.

Процесс моделирования развития лесного пожара представляет собой итерационную процедуру, при которой через заданные промежутки времени (30 мин) определяются параметры эллиптической модели: на первом этапе моделирования производится прогноз распространения лесного пожара за первые 30 мин; на втором и последующих этапах (через каждые 30 мин) рассчитывается расстояние, пройденное пожаром с учетом лесотаксационной характеристики затронутых выделов и метеорологической обстановки. Для построения контура лесного пожара на втором и последующих этапах в каждом узле эллипса, построенного на предыдущем этапе, на основании скорости, рассчитанной в данном узле, строится новый эллипс. Его длинная ось располагается по направлению ветра. Для определения длины короткой оси эллипса (формула (26)) первоначально рассчитывается соотношение длин осей эллипса по уравнению (24):

$$b = \frac{a}{LB}. \quad (26)$$

В процессе итерационной процедуры построения эллиптической модели развития лесного пожара направление ветра может изменяться. В этом случае при изменении направления ветра в каждом узле контура лесного пожара на данный

момент строится эллипс параллельно направлению ветра. Контур пожара на следующий временной период определяется путем соединения крайних точек эллипсов (рис. 4).

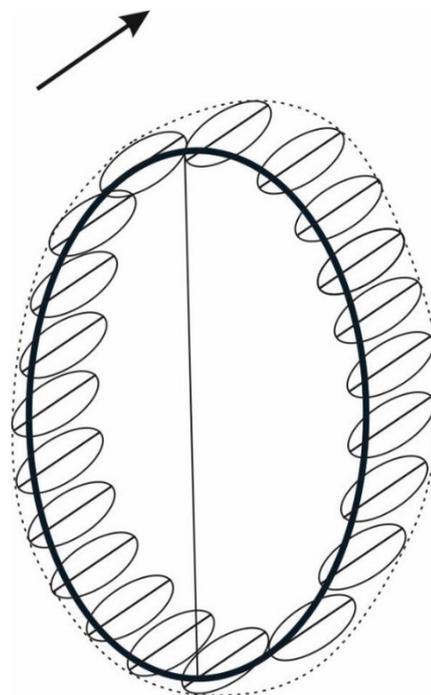


Рис. 4. Моделирование контура пожара при изменении направления ветра

Представленный подход позволяет проводить прогнозирование распространения лесного пожара в древостоях с различными таксационными показателями и при различных метеорологических условиях.

Для уточнения границ распространения пожара с учетом преград после построения эллипса на определенный момент времени выполняется его оверлейный анализ относительно картографического слоя естественных и искусственных преград: квартальные просеки шириной более 4 м, дороги шириной более 4 м, реки, ручьи, каналы, противопожарные разрывы, минерализованные полосы.

В случае наложения эллиптической модели на векторный картографический слой преград построенный эллипс развития лесного пожара должен быть обрезан по границе этой преграды. Таким образом, в результате моделирования рассчитываются расстояния, прошедшие лесным пожаром до фронта и флангов с учетом размещения естественных и искусственных преград распространения пожара. Это позволяет определить прогнозные границы лесного пожара на необходимый момент времени, узнать его прогнозную площадь, что даст возможность более объективно оценить уровень угрозы и необходимый объем ресурсов для его ликвидации.

**Заключение.** На данном этапе исследований разработаны методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий, на основании которых разработан программный комплекс «Моделирование лесного пожара». Моделирование проводится по разработанному алгоритму с использованием лесоводственно-таксационных и метеорологических показателей. Программный комплекс, созданный на основании алгоритма, рассчитывает скорость распространения лесного пожара и строит графическое представление модели развития лесного пожара на геопространственной основе.

В ходе проведенных проверок программного комплекса было установлено, что результаты моделирования отображают влияние изменения направления ветра и скорости распространения пожара в зависимости от вида лесных земель и растительности по десяти расчетным группам в соответствии с методическими рекомендациями. Дальнейшее совершенствование вычислительных алгоритмов с учетом последующих обновлений базы данных, включающей новую информацию о возникающих в лесном фонде пожарах, позволит повысить 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 // М-во лесного хоз-ва Респ. Беларусь. URL: <https://www.mlh.gov.by/news/9997/> (дата обращения: 13.09.2024).
3. Работа не прекращалась даже ночью. За прошедшие сутки гослесохрана тушила 12 возгораний в лесном фонде // Telegram. URL: <https://web.telegram.org/a/#-1001262331203> (дата обращения: 12.10.2024).
4. База данных характеристик лесных пожаров / А. А. Пушкин [и др.] // 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.
5. Методические рекомендации по прогнозированию развития лесных пожаров с учетом данных о состоянии лесных массивов и метеорологических условий. Минск: БГТУ, 2023. 12 с.
6. Технические указания по заполнению карточек таксации при таксации леса. Минск: Белгослес, 2019. 125 с.
7. Справочник таксатора / В. С. Мирошников [и др.]. Минск: Ураджай, 1980. 360 с.
8. Юркевич И. Д., Гельтман В. С. География, типология и районирование лесной растительности Беларуси. Минск: Наука и техника, 1965. 288 с.
9. Погода в 243 странах мира // Расписание Погоды. URL: <https://rp5.ru> (дата обращения: 18.08.2024).
10. Леонович И. И. Метеорологические станции Республики Беларусь. Минск: БНТУ, 2013. 137 с.
11. Meteoeye. URL: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (дата обращения: 12.09.2024).
12. Сервис «Карта пожаров». URL: <https://fires.ru/> (дата обращения: 15.09.2024).
13. Рихтер И. Э. Лесная пирология с основами радиоэкологии: учеб. пособие. Минск: БГТУ, 1996. 290 с.
14. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
15. Background Information. 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: 13.09.2024).
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. Численные методы / В. М. Заварыкин [и др.]. 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.gov.by/news/9997/> (accessed 13.09.2024) (In Russian).

3. The work did not stop even at night. Over the past day, the state forest service extinguished 12 fires in the forest fund. URL: <https://web.telegram.org/a/#-1001262331203> (accessed 12.10.2024) (In Russian).

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

5. *Metodicheskiye rekomendatsii po prognozirovaniyu razvitiya lesnykh pozharov s uchetom dannykh o sostoyanii lesov i meteorologicheskikh usloviy* [Methodological recommendations for forecasting the development of forest fires, taking into account data on the state of forests and meteorological conditions]. Minsk, BSTU Publ., 2023. 12 p. (In Russian).

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

7. Miroshnikov V. S., Trull O. A., Ermakov V. E., Dolsky L. V., Kostenko A. G. *Spravochnik taksatora* [Taxi driver's directory]. Minsk, Uradzhay Publ., 1980. 360 p. (In Russian).

8. 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 Technika Publ., 1965. 288 p. (In Russian).

9. Weather in 243 countries. Available at: <https://rp5.ru> (accessed 18.08.2024) (In Russian).

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

11. Meteoeye. Available at: <https://meteoeye.gis.by/hotspots/> (accessed 12.09.2024) (In Russian).

12. Fire Map service. Available at: <https://fires.ru/> (accessed 15.09.2024) (In Russian).

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

14. 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).

15. Background Information. Available at: <https://cwffis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi?wbdisable=true#:~:text=The%20Fine%20Fuel%20Moisture%20Code,the%20flammability%20of%20fine%20fuel> (accessed 13.09.2024).

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., Lupyan E. A. Regional optimization of parameters of the forecast model of natural fires 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., Zhitomirsky 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 (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [pushkin@belstu.by](mailto:pushkin@belstu.by)

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

**Толкач Игорь Владимирович** – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, доцент кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [i.tolkach@belstu.by](mailto:i.tolkach@belstu.by)

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

**Севрук Павел Владимирович** – кандидат сельскохозяйственных наук, старший преподаватель кафедры лесоустройства. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [sevrukpv@belstu.by](mailto:sevrukpv@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](mailto: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](mailto:Wolodia250@belstu.by)

**Tolkach Igor Vladimirovich** – 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: [i.tolkach@belstu.by](mailto:i.tolkach@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](mailto:sidelnik@belstu.by)

**Sevruk 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: [sevrukpv@belstu.by](mailto:sevrukpv@belstu.by)

*Поступила 15.10.2024*