

### Список литературы

1. Tanaka K., Wang H.O. Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. New York: Wiley, 2001.
2. Игонина Е.В., Масина Е.В., Дружинина О.В. Анализ устойчивости динамических систем на основе методов интеллектуального управления и свойств линейных матричных неравенств. Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2020.
3. Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С. Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: ЛЕНАНД, 2014.
4. Талагаев Ю.В., Сараев П.В. Ремоделирование нелинейных систем на основе нечетких моделей Такаги–Сугено // Нелинейный мир. 2020. Т. 18. Вып. 2. С. 18–32.
5. Talagaev Y. Fuzzy Remodeling and Synthesis of the Class of Nonlinear Systems Based on the Invariant Ellipsoid Technique // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia. 2019. P. 64–68.

### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АНАЛИЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Таранчук В.Б.<sup>1</sup>, Баровик Д.В.<sup>2</sup>

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

e-mail: <sup>1</sup>taranchuk@bsu.by, <sup>2</sup>barovikd@gmail.com

**Аннотация.** Обсуждаются методические и технические решения разработки и использования компьютерной модели распространения низовых лесных пожаров. Приведена принятая в двумерном приближении постановка начально-краевой задачи, решаемая численно система дифференциальных уравнений в частных производных. Представлены результаты вычислительных экспериментов по изучению структуры и динамики температурного фронта и векторных полей градиента концентрации кислорода на площади горения при наличии неоднородностей в плотности лесного горючего материала. Установлены и поясняются особенности распространения границ зон пожаров во фронте, тыле и флангах для разных конфигураций и площадей неоднородностей, в том числе при различных скоростях ветра.

**Ключевые слова:** низовой лесной пожар, математическая модель, программный комплекс, динамика фронта пожара, градиент концентрации кислорода, размер и форма неоднородности напочвенного покрова, скорость ветра.

### METHODS AND TOOLS FOR ANALYSIS AND VISUALIZATION OF THE RESULTS OF COMPUTER MODELLING OF SURFACE FOREST FIRES

Taranchuk V.B.<sup>1</sup>, Barovik D.V.<sup>2</sup>

Belarusian State University, Minsk, Belarus

e-mail: <sup>1</sup>taranchuk@bsu.by, <sup>2</sup>barovikd@gmail.com

**Abstract.** Methodological and technical solutions for the development and use of a computer model for the spread of surface forest fires are discussed. The statement of the initial-boundary value problem accepted in the two-dimensional approximation and the system of

differential equations in partial derivatives that can be solved numerically is presented. The results of computational experiments on the study of the structure and dynamics of the temperature front and vector fields of the oxygen concentration gradient on the combustion area in the presence of inhomogeneities in the density of the forest combustible materials are presented. The features of the distribution of the boundaries of fire zones in the front, rear and flanks for different configurations and areas of inhomogeneities, including at different wind speeds, are present and explained.

**Keywords:** surface forest fire, mathematical model, software, fire front dynamics, oxygen concentration stream plot, fuelbreak shape, fuelbreak size, wind velocity.

Лесные пожары наносят вред экологии и качеству воздуха, имеют значительные социальные и экономические последствия. Существуют целые регионы, в которых горение лесов происходит с регулярной периодичностью, и при этом нет успешности в их предотвращении и тушении – очевидно, что нужны новые технические решения, более эффективные методы организации и управления. Критичным при этом является этап ликвидации чрезвычайных ситуаций, когда для принятия оптимальных управленческих решений принципиально важно иметь достоверные прогнозы распространения фронта горения, в том числе, оценки затрат и последствий при альтернативных вариантах действий. В правильных экспертных решениях обязательны учет конкретной обстановки, состава и состояния растительности, рельефа территории, истории и текущих погодных условий, множества других факторов. Понятно, что анализировать громадный объем информации в очень сжатые сроки затруднительно без использования информационных технологий, а проигрывать сценарии с оценками разных вариантов действий без моделей развития процессов вовсе невозможно. Выход – использовать созданные, проверенные компьютерные модели.

Профессор Гришин А.М. создал наиболее полную теоретическую модель [1], на основе которой многие авторы, включая авторов данной статьи, адаптируют ее для практического применения [2, 3].

В большинстве публикаций об использовании компьютерных моделей для анализа лесных пожаров рассматриваются процессы только в однородных средах, но в реальности лесные горючие материалы распределены неоднородно. В данной работе представлены результаты моделирования низовых лесных пожаров в двумерном приближении. Исследуются распределения температуры и полей градиентов концентрации кислорода, вызванные неоднородностями плотности горючей растительности на площади.

Принятая в данном исследовании *математическая модель распространения лесных пожаров* позволяет рассчитывать распределения по площади и динамику следующих величин: температура лесного массива –  $T$ ; объемные доли компонент лесного горючего материала (ЛГМ) –  $\varphi_j, j = 1, 2, 3, 4$ , где индексом 1 обозначено сухое органическое вещество ЛГМ, 2 – содержащаяся в растительности вода в связанной и свободной формах, 3 – являющийся продуктом пиролиза ЛГМ древесный уголь, 4 – негорючая минеральная часть ЛГМ;  $c_v, v = 1, 2, 3$  – массовые концентрации компонентов газовой фазы, индексы идентифицируют: 1 – кислород, 2 – горючие газы,

возникающие в процессе термического разложения, 3 – смесь остальных негорючих газов. В формулируемой начально-краевой задаче определяемыми функциями модели являются  $T$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ,  $\varphi_4$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ , которые зависят, как от времени, так и от пространственных координат, и связаны следующими дифференциальными уравнениями (1) – (3):

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = \Phi_{\varphi 1}, \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \Phi_{\varphi 2}, \quad \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \Phi_{\varphi 3}, \quad \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + (V, \text{grad} c_i) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad} c_i) = \Phi_{ci}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_5 c_{p5} (V, \text{grad} T) - \text{div}(\lambda_T \text{grad} T)}{\rho_5 c_{p5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{pj}} = \Phi_T. \quad (3)$$

Полное описание модели, используемые обозначения, значения коэффициентов и определяющих параметров модели, в т.ч. плотности компонент ЛГМ, теплоемкости, коэффициенты физико-химических реакций и другие величины приведены в работе [2]. Способ задания корректных начальных и граничных условий подробно описан в публикациях [4].

*Программный комплекс расчета динамики лесного пожара* создан авторами в системе компьютерной алгебры Wolfram Mathematica [5]. Решения системы дифференциальных уравнений рассчитываются с применением явных конечно-разностных схем, используется равномерная по пространству сетка; шаг по времени определяется условиями устойчивости [4] с учетом особенностей и интенсивности протекания физико-химических процессов на каждом временном слое. Результаты расчетов сохраняются в базе данных, разработаны средства для их интеллектуальной обработки и визуализации [5].

Ниже приведены и обсуждаются в качестве демонстрации несколько результатов расчетов основных характеристик пожара в области, ограниченной сторонами квадрата с длиной двадцать метров. Динамика пожара изучается на площади лесного массива, когда в центре области происходит возгорание. Считается, что направление ветра в пологе леса ориентировано по оси  $Ox$  (слева-направо). При этом во фронте, тыле и на направлении левого фланга пожара имеются участки (далее называемые полянами) существенно более низкого содержания горючего материала, чем в основной части площади. На приведенных ниже рисунках отображаются различные состояния лесного горючего материала; зеленым оттенком показаны участки площади, где массив в начальном состоянии, коричневым – поляны, в оттенках синего – выгоревший покров. Также цветовой шкалой (от голубого через белый и желтый до красного) в иллюстрации синтезированы карты плотности распределения температуры – показывают положение и форму текущей кромки пожара. «Каплями» показаны направления градиентов массовой концентрации кислорода, размер капель масштабируется по интенсивности.

Пример расчета динамики преодоления пожаром круглых полей площадью  $18 \text{ м}^2$  каждая в три момента времени приведен на рис. 1.

Равновесная скорость ветра на середине высоты пламени  $V = 1,5$  м/с. «Капли» иллюстрируют направления и величину градиента концентраций кислорода. Маркеры показаны только в зоне пожара, в не затронутых пожаром областях значения концентраций газов и температуры постоянны. В моделируемых условиях пожар распространяется только в направлении ветра.

На рис. 2 показаны результаты моделирования ситуаций преодоления лесным пожаром прямоугольных участков без горючей растительности площадью  $2,25$  м<sup>2</sup> каждая при идентичности всех остальных параметров моделирования как в предыдущем примере. Видно, что при «прохождении» полян кромка пожара разрывается, а потом автономные части кромки вновь смыкаются по и перпендикулярно направлению ветра. В серии вычислительных экспериментов [6] было показано различие в результирующей конфигурации изотерм фронта после преодоления разных форм полян (прямоугольных, круглых, квадратных).

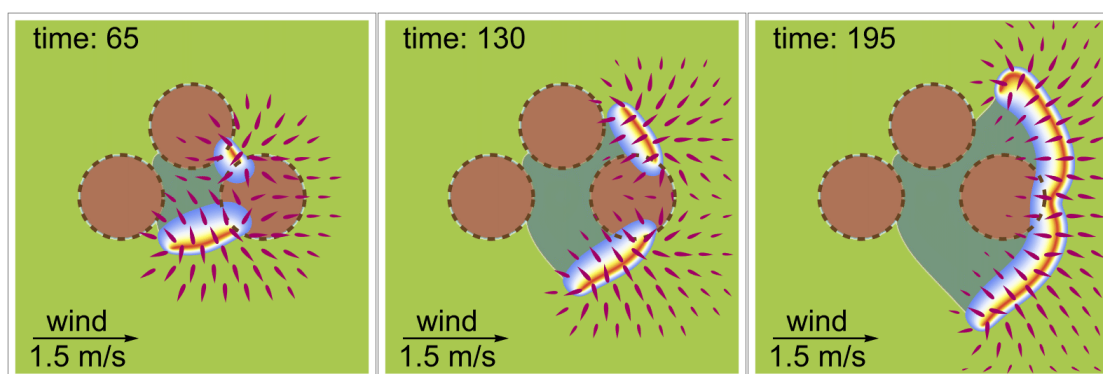


Рис. 1. Преодоление пожара круглых полян

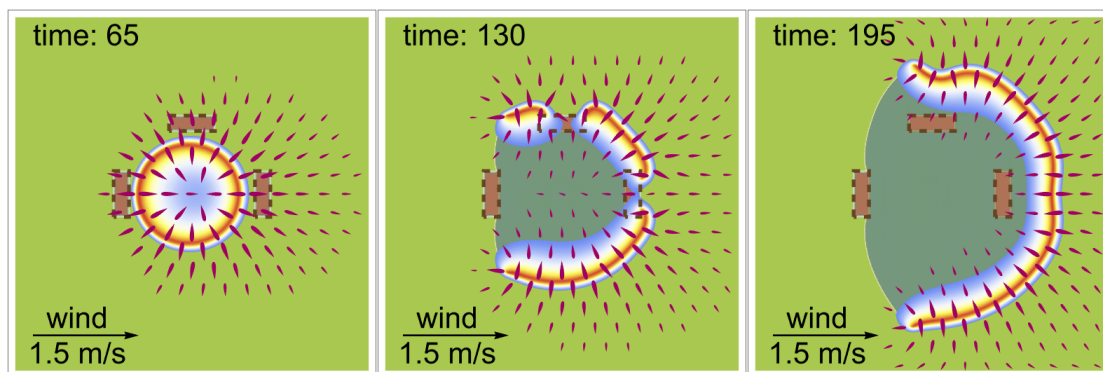


Рис. 2. Динамика пожара для геометрии полян прямоугольной формы

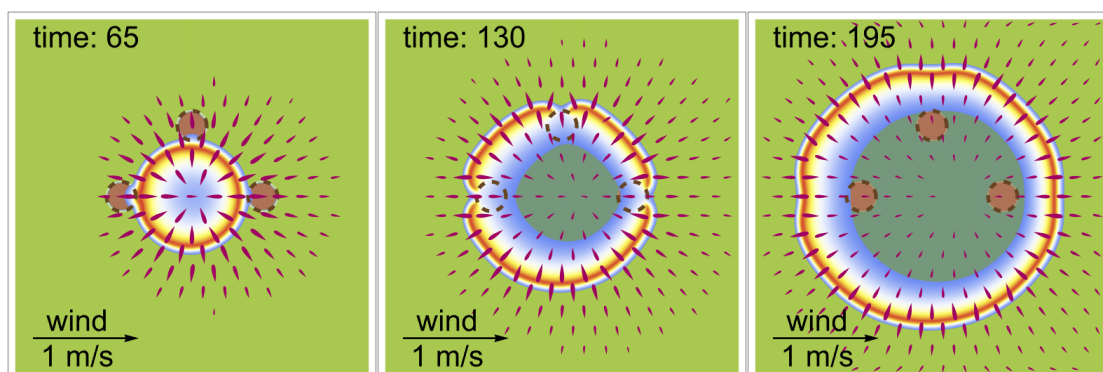


Рис. 3. Преодоление пожаром круглых полян при скорости ветра 1 м/с

Рис. 3. демонстрирует влияние скорости ветра. В показанных результатах вычислительных экспериментов в части геометрии рассматриваются случаи круглых полян «малого» размера (равного площади прямоугольных полян рис. 2). Отличие состоит в том, что скорость ветра  $V$  равна 1 м/с. При этом кромка пожара преодолевает поляны во всех направлениях, в том числе, и против ветра. Примечательно и то, что ширина полосы отжига в направлении ветра более узкая, чем на флангах, а в тылу эта ширина максимальна. На рисунке 3 в момент времени 195 заметно, что точка минимального градиента концентрации кислорода смещена вправо (по направлению ветра), относительно центра первоначального возникновения пожара. Наиболее вероятная причина – влияние конвективного переноса, обусловленного направлением и интенсивностью ветра.

Завершая обсуждение примеров расчетов, иллюстраций, отметим, что в разработанном программном комплексе в дополнение к представленным на рисунках распределениям температуры и плотностей лесных горючих материалов также вычисляются и сохраняются в базе данных распределения объемов выделяемого водяного пара, загрязняющих окружающую среду газов, угля и золы. Соответствующие площадные распределения в контрольные моменты времени можно визуализировать картами, а интегральные характеристики представлять в таблицах, графиками изменений со временем процесса.

Таким образом, обсуждаются результаты вычислительных экспериментов по воспроизведению возможных специфических сценариев, чтобы выявить отличия в эволюции фронта огня и градиентов концентрации кислорода при распространении низовых лесных пожаров в различных условиях, в т.ч. с учетом видов и характеристик лесной горючей растительности, наличия полян разных размеров и форм, влияния скорости ветра в пологе леса. Отметим, что моделирование является вычислительно трудоемкими, расчеты любого из вариантов занимают несколько суток. Однако, отработаны методические и технические решения использования искусственных нейронных сетей и на основе сформированной базы данных результатов расчетов планируется создание полуэмпирических моделей [7], тогда прогнозирование динамики лесных пожаров будет возможно в реальном масштабе времени.

### Список литературы

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение; 1992. 408 с.
2. Barovik D., Taranchuk V. Mathematical modelling of running crown forest fires. *Mathematical Modelling and Analysis*. 2010;15(2):161–174.
3. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Компьютерная модель, примеры анализа влияния ландшафтно-метеорологических факторов на динамику низовых лесных пожаров. *Экономика. Информатика*. 2020;47(3):610–622.
4. Баровик Д.В., Корзюк В.И., Таранчук В.Б. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров. *Труды института математики*. 2013;21(1):3–15.
5. Taranchuk V. Tools and examples of intelligent processing, visualization and interpretation of GEODATA. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2020:1425:012160.

6. Barovik D.V., Taranchuk V.B. Tools for the analysis and visualisation of distributions and vector fields in surface forest fires modelling // Journal of the Belarusian State University. Mathematics and Informatics. 2022;(2):82–93.

7. Баровик Д.В., Таранчук В.Б., Школьников Л.В. Структура и функционал модуля «оперативно-аналитический блок» программного комплекса регистрации и обработки сообщений о чрезвычайных ситуациях. Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. 2013;2(34):84–94.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВАМИ И ПАССИВАМИ БАНКА НА НЕСОВЕРШЕННОМ РЫНКЕ КАПИТАЛА

Жукова А.А.<sup>1</sup>, Флёрова А.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Федеральное государственное учреждение "Федеральный  
исследовательский центр "Информатика и управление" Российской  
академии наук", Москва, Россия

e-mail: <sup>1</sup>zhukova.aa@phystech.edu, <sup>2</sup>a.flerova@phystech.edu

**Аннотация.** В работе рассматривается математическая модель управления активами и пассивами банка, осуществляющего свою деятельность в условиях законодательных ограничений, направленных на регулирование и стабильную работу банковского сектора. Модель формализована задачей оптимального управления с фазовыми ограничениями, решение которой в общем случае имеет определенные трудности, связанные с выполнением условий регулярности. В данной работе представлены результаты численного анализа модели.

**Ключевые слова:** банковская система, оптимальное управление, математическое моделирование.

## MODELING OF ASSET AND LIABILITY MANAGEMENT OF A BANK IN AN IMPERFECT CAPITAL MARKET

Zhukova A.A.<sup>1</sup>, Flerova A.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Federal Research Center "Computer Science and Control" of the Russian  
Academy of Sciences

e-mail: <sup>1</sup>a.flerova@phystech.edu, <sup>2</sup>zhukova.aa@phystech.edu,

**Abstract.** The paper considers a mathematical model for managing the assets and liabilities of a bank operating under the conditions of legislative restrictions aimed at regulating and stable operation of the banking sector. The model is formalized by an optimal control problem with phase constraints, the solution of which in the general case has certain difficulties associated with the fulfillment of the regularity conditions. This paper presents the results of a numerical analysis of the model.

**Keywords:** banking system, optimal control, mathematical modeling.

В настоящее время мировая экономика переживает последствия трудностей в банковском секторе, связанных с банкротством некоторых крупных банков. Для исследования взаимодействий участников рынка банковских услуг, а также для того, чтобы оценить эффективность законодательных ограничений в

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ЕЛЕЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И.А. БУНИНА»**

**ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ, ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ И ТЕХНИКИ**

**КАФЕДРА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ,  
КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
СЛОЖНЫЕ СИСТЕМЫ:  
МОДЕЛИРОВАНИЕ, УСТОЙЧИВОСТЬ,  
СТАБИЛИЗАЦИЯ,  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

**Материалы IX Международной  
научно-практической конференции**

**24-25 апреля 2023 г.**

Елец – 2023

УДК 51  
ББК 32.97  
С 34

*Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Елецкого государственного университета им. И.А. Бунина  
от 22.02.2023 г., протокол №1*

Редколлегия:

**О.Н. Масина**, доктор физико-математических наук, доцент  
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина);  
**О.В. Дружинина**, доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник (Федеральный исследовательский центр  
«Информатика и управление» Российской академии наук).

Рецензенты:

**Г.М. Биленко**, кандидат технических наук, доцент,  
зав.кафедрой «Управление транспортными процессами» РУТ(МИИТ);  
**В.Е. Щербатых**, кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры математики и методики ее преподавания  
(Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина)

**С 34** Системы управления, сложные системы: моделирование, устойчивость, стабилизация, интеллектуальные технологии: материалы IX Международной научно-практической конференции. 24-25 апреля 2023 г. – Елец: Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина, 2023. – 303 с.  
**ISBN 978-5-00151-364-3**

В сборнике представлены материалы IX Международной научно-практической конференции, проходившей в ЕГУ им. И. А. Бунина 24-25 апреля 2023 г. Включенные в сборник материалы посвящены теоретическим аспектам, практическим приложениям и современным тенденциям в области системного анализа, управления и обработки информации, теории устойчивости и стабилизации динамических систем, компьютерной алгебры, математического моделирования технических систем с применением комплексов проблемно-ориентированных программ. Рассмотрены возможности применения информационных технологий в сфере образования, научных исследований, технических разработок.

Сборник предназначен научным работникам, преподавателям вузов, аспирантам, магистрантам, студентам.

УДК 51  
ББК 32.97

**ISBN 978-5-00151-364-3**

© Елецкий государственный  
университет им. И.А. Бунина, 2023