

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-48-55>

УДК 631.445.12:631.436



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОЗГОРАНИЯ ТОРФЯНОЙ ПОЧВЫ

О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов , А.С. Гузалов, Н.Н. Пуляев, А.В. Куриленко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

Аннотация. Целью исследований являлась разработка математической модели, позволяющая использовать ее в дальнейшем для разработки компьютерной программы составления прогнозов возникновения торфяных пожаров на землях, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот. Проведено математическое описание процесса самовозгорания, происходящего по следующей схеме: тепловой поток нагревает поверхность до температуры зажигания, в результате чего возникает самонагревающаяся зона. В итоге формируется волна горения (тления), которая способна самостоятельно распространяться. Представлены методика и лабораторное оборудование для исследования саморазогрева образцов торфа. Проанализированы результаты экспериментальных и теоретических исследований химической реакции саморазогрева образцов торфа. Энергия активации образцов торфа определялась методом подбора и подстановки значений в уравнения и сравнения полученных результатов с расчетными. Результаты исследований позволили оценить высокую корреляцию с экспериментальными данными в зависимости от содержания общего органического углерода в торфяной почве. Таким образом, математическую модель можно использовать для прогнозирования возникновения эффекта самовозгорания.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 24-16-00081 (URL: <https://rscf.ru/project/24-16-00081/>).

Ключевые слова: торфяная почва, объемная плотность, степень разложения, зольность, пожары, экология, выбросы углерода, углерод, сера, железо

Формат цитирования: Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С., Пуляев Н.Н., Куриленко А.В. Математическое моделирование самовозгорания торфяной почвы // Природообустройство. 2025. № 1. С. 48-55. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-48-55>

Scientific article

MATHEMATICAL MODELING OF SPONTANEOUS COMBUSTION OF PEAT SOIL

O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov, A.S. Guzalov, N.N. Pulyaev, A.V. Kurilenko

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; 49 Timiryazevskaya St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. The aim of the study is to develop a mathematical model that can be used in the future to develop a computer program for forecasting the occurrence of peat fires on lands involved in agricultural circulation. A mathematical description of the spontaneous combustion process is given, which occurs according to the following scheme: the heat flow heats the surface to the ignition temperature, resulting in a self-heating zone. As a result, a combustion (smoldering) wave is formed, which is capable of self-propagating. The methodology and laboratory equipment for studying the self-heating of peat samples are presented. The results of experimental and theoretical studies of the chemical reaction of self-heating of peat samples are analyzed. The activation energy of peat samples was determined by selecting and substituting values into equations and comparing the obtained results with the calculated ones. The results of the study made it possible to estimate a high correlation with experimental data depending on the content of total organic carbon in peat soil. Thus, the mathematical model can be used to predict the occurrence of the spontaneous combustion effect.

The research was carried out at the expense of a grant from the Russian Science Foundation No. 24-16-00081 (URL: <https://rscf.ru/project/24-16-00081/>)

Keywords: peat soil, bulk density, degree of decomposition, ash content, fires, ecology, carbon emissions, carbon, sulfur, iron

Format of citation: Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Pulyaev N.N., Kurylenko A.V. Mathematical modeling of spontaneous combustion of peat soil // Prirodoobustrojstvo. 2025. No. 1. С. 48-55. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-1-48-55>

Введение. Сжигание биомассы является основным глобальным источником газопылевых выбросов в атмосферу и считается одним из основных экотоксикологических факторов риска для здоровья населения.

Дым торфяных пожаров по своему составу представляет собой аэрозольно-газовую смесь, в которую входят: CO, CO₂, NO₂, SO₂; водяные испарения; твердые частицы, 90% которых имеют размеры меньше 0,1 мкм и в состав которых входят сажи, золы, пепел и смолы; продукты трансформации компонентов горючего материала. В задымленном воздухе присутствуют также акролеин и ацетальдегид в концентрациях, превышающих ПДК, которые оказывают гипоксическое, гемотоксическое и нейротоксическое действие на человека [1-3].

По независимой оценке Центра охраны дикой природы, общий экономический ущерб от природных пожаров прогнозируется на уровне 10 трлн руб. (375 млрд долл.) [4].

В процессе торфяных пожаров в РФ, по результатам исследований геобиоцентра Мюнхенского университета (Германия), в приземные слои атмосферы планеты выбрасывается от 30 до 100 млн т двуокиси углерода [5].

При длительном воздействии крупных природных пожаров или множества мелких пожаров в атмосфере образуются постоянные области повышенного давления. Циклоны обходят эти районы стороной, создавая в районе пожара более сухую и жаркую погоду, чем обычно.

Возможность возгорания осушенных месторождений торфа представляет собой угрозу возникновения негативных экологических и климатических последствий для населения, экосистем и экономики в целом. При этом в результате природных пожаров в атмосферу поступают парниковые газы.

Торфяные пожары оказывают большое влияние на увеличение сезонной глубины промерзания почв (в связи с выгоранием почвы, уменьшением утепляющего воздействия происходит нарушение теплофизических параметров почвенных слоев), увеличивают поверхностный сток и повышают степень деградации почв за счет увеличения водной и ветровой эрозии на значительных площадях.

Цель исследований: разработка математической модели для составления прогнозов возникновения торфяных пожаров на землях, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот.

Материалы и методы исследований. В результате химической и энергетической неоднородности склонность к самовозгоранию одних и тех же материалов неодинакова и характеризуется различными значениями кинетических параметров. Такими свойствами обладает торф. Окислительные процессы экзотермичны, поэтому они ведут к самонагреванию окисляющегося материала. Как только температура самонагревающейся массы превысит температуру окружающей среды, начинается процесс охлаждения. Интенсивность теплоотвода определяется размером и формой скопления самонагревающегося материала, его теплофизическими свойствами, коэффициентом внешнего теплообмена, а также условиями внешней среды.

Тепловое самовозгорание происходит при следующих условиях:

- скорость самонагревания \geq скорости охлаждения;
- темп самонагревания \geq темпа охлаждения.

Процесс самовозгорания происходит по следующей схеме: тепловой поток нагревает поверхность до температуры зажигания T_z , в результате чего возникает самонагревающаяся зона. В итоге формируется волна горения (тления), которая способна самостоятельно распространяться.

При проведении экспериментальных исследований пожароопасности отобранных образцов торфа была применена методика экспериментального определения условий теплового самовозгорания, согласно которой в контейнере цилиндрической формы размером 30 × 30 мм, изготовленном из латунной сетки с ячейкой 0,8 мм, загружается испытуемый материал, внутри контейнера размещаются термодары, фиксирующие температуру поверхности и центра образца, где возникает очаг тления или горения испытуемого материала.

Для проведения экспериментальных исследований пожароопасности торфяных почв сельскохозяйственных угодий были отобраны

образцы в Московской, Рязанской и Тверской областях, определен их физико-химический состав (табл. 1).

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторного оборудования:

- сушильный шкаф СНОЛ-3.5;
- термодары ДТКП-0.5-4;
- измеритель-регистратор 8 каналов ОВЕН;

- программное обеспечение ОВЕН;
- весы АСЗЕТ СУ-513, точность 0,001 гр.;
- контейнер из латунной сетки 30 × 30 мм с ячейкой 0,8 мм.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1 [6-8].

Отобранные образцы торфа, представленные в таблице 1, загружались в контейнеры (рис. 1), внутри которых были размещены

Таблица 1. Химический состав образцов торфа

Table 1. Chemical composition of peat samples

№	Гигроскопическая влажность, % <i>Hygroscopic humidity, %</i>	Сера подвижная, млн-1 <i>Mobile sulfur, ppm</i>	Массовая доля железа, млн-1 (валовая форма) <i>Mass fraction of iron, ppm (gross form)</i>	Массовая доля зольности, % <i>Mass fraction of ash content, %</i>	Общий (органический) углерод <i>Total (organic) carbon</i>	Метод степени разложения <i>Degree of decomposition method</i>
	ГОСТ 5180 <i>GOST 5180</i>	ГОСТ 26490 <i>GOST 26490</i>	М МВИ-80-2008 <i>M MVI-80-2008</i>	ГОСТ 27784-88 <i>GOST 27784-88</i>	Метод сухого сжигания <i>Dry incineration method</i>	ГОСТ 10650 <i>GOST 10650</i>
Тверская область / Tverskaya region						
T1	13,88	19,5	3287,5	77,53	22,47	35,2
T2	20,14	6,6	2381,25	33,99	66,0	4,8
T3	25,2	23,4	3781	36,3	63,7	6,1
Рязанская область / Ryazanskaya region						
P1	3,6	9,3	91	89,6	10,4	52,5
P2	10,4	25,2	742	75,3	24,7	30,6
P3	50,7	22,2	93	45,0	55,0	27,8
Московская область / Moskovskaya region						
M1	14,26	16,4	934,3	72,4	19,8	38,6
M2	15,2	29,4	836	69,8	23,2	35,1
M3	45,8	28,5	40	35,8	60,1	5,5

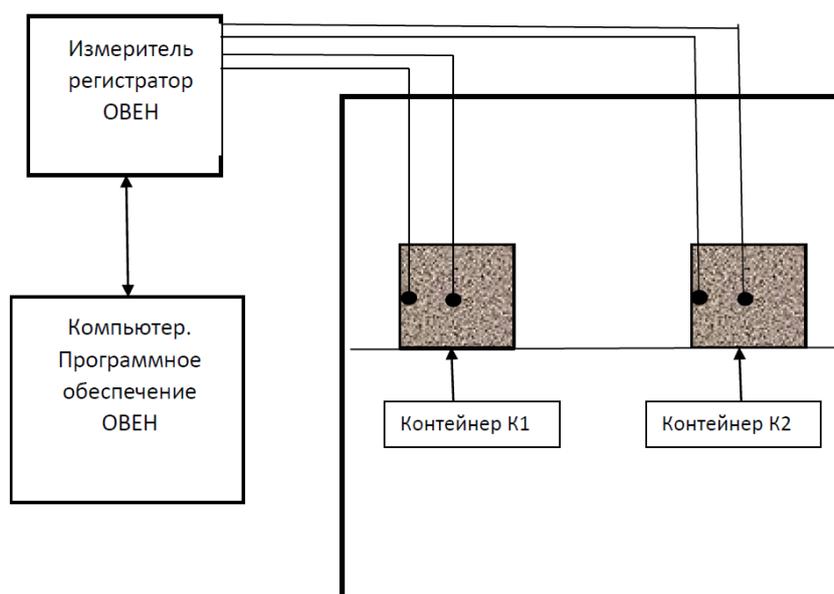


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Fig. 1. Scheme of the experimental facility

термопары, которые фиксировали температуру теплофизического центра и поверхности, размещенного в них торфа с интервалом 1 с, очаг самовозгорания возникал в центре испытуемого материала (рис. 2) [6-8].

В процессе эксперимента в сушильном шкафу с 8.00 до 18.00 поддерживалась температура 58°C, в вечернее и ночное время она составляла 20°C, что соответствует природным условиям [6-8].

При самовозгорании процесс горения возникает при определенном соотношении интенсивности теплоотвода и тепловыделения. Тление протекает в диффузионном режиме горения. В случае притока в зону тления окислителя скорость тления возрастает, и оно может переходить в стадию пламенного горения. Волна тления в обезвоженном материале распространяется так же, как волна горения.

Ориентировочную оценку опасности теплового самовоспламенения дает стандартная температура самовоспламенения. В отличие от самовоспламенения самовозгорание может происходить при комнатных температурах.

При саморазогреве тела теплота передается в окружающую среду через поверхность площадью F , м². Через эту поверхность в единицу времени отводится количество теплоты Q' , которое экспериментально было

получено И. Ньютоном [9] и записывается в виде уравнения:

$$Q' = \alpha \cdot F \cdot \Delta T_F, \quad (1)$$

где α – коэффициент пропорциональности или коэффициент теплоотдачи Вт м⁻² К⁻¹; ΔO_F – разность температур поверхности тела и окружающей среды.

Данное уравнение, описывающее теплоотвод, является линейным.

При отводе тепла от тела в окружающую среду оно будет охлаждаться. Данный процесс при линейном законе охлаждения описывается уравнением скорости охлаждения:

$$P' = \frac{\Delta T_F}{\Delta \tau}, \quad (2)$$

где P' – скорость охлаждения К с⁻¹; $\Delta \tau$ – отрезок времени.

Фактическая скорость охлаждения P' в любой момент времени может определяться через производную:

$$P' = \lim_{\Delta \tau \rightarrow 0} \frac{\partial T'}{\partial \tau}. \quad (3)$$

По Я.С. Киселёву [9] скорость охлаждения можно записать в виде:

$$P' = \frac{\alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V}, \quad (4)$$

где c_p – удельная теплоемкость, Дж/(Кл · К); ρ – плотность материала, кг/м³; V – объем, м³.

Линейный темп охлаждения – величина постоянная и выражается уравнением:

$$m_{ox} = \frac{\alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V}, \quad 1/c. \quad (5)$$

Следует отметить, что уравнение (2) справедливо при охлаждении тела без внутренних источников теплоты или саморазогрева. Наличие таких источников учитывается критерием неравномерности нагрева.

Критерий неравномерности нагрева –

$$\psi = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_{Ц}}, \quad (6)$$

где $\Delta T_{Ц}$ – разность между температурами теплофизического центра нагреваемого материала и окружающей среды $T_{Ц} - T_{окр}$,

$$\text{или} \quad \psi = \frac{\Delta T_F}{\Delta T_{Ц}} = \frac{n \cdot \lambda}{\alpha \cdot R_x + n \cdot \lambda}, \quad (7)$$

где ΔO_F – температура поверхности, К; $\Delta T_{Ц}$ – температура теплофизического центра, К; n – относительный температурный градиент, который зависит от кривизны теплообменной поверхности, $n = 2$ [10, 11]; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); R_x – определяющий размер скопления материала, радиус или половина высоты слоя, м.

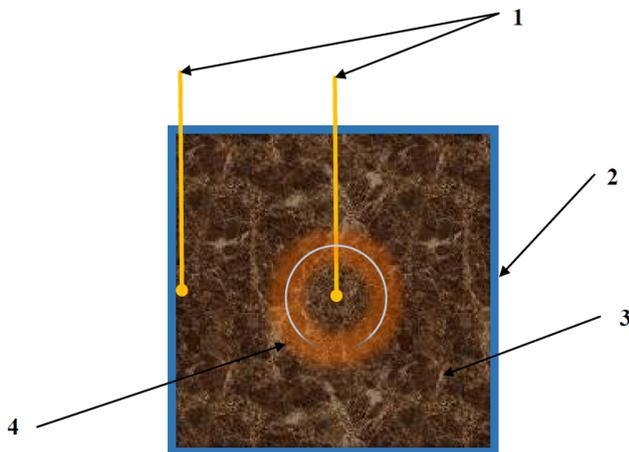


Рис. 2. Схема размещения термопар в контейнере:

1 – термопары; 2 – контейнер из латунной сетки размером 30 × 30 мм с размером ячейки 0,8 мм; 3 – образцы торфа; 4 – место возникновения очага самовозгорания в режиме тления

Fig. 2. Layout of thermocouples in a container, where

1 – thermocouples, 2 – a container made of brass mesh 30 × 30 mm with a mesh size of 0.8 mm, 3 – peat samples, 4 – the place of occurrence of the source of spontaneous combustion in the smoldering mode

В естественных условиях точки тела охлаждаются с неодинаковыми скоростями. Неравномерность процесса учитывают также с помощью критерия неравномерности нагрева, тогда скорость охлаждения и темп охлаждения выглядят следующим образом:

$$P' = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V} \cdot \Delta T; \quad (8)$$

$$m_{ox} = \frac{\alpha \cdot F}{c_p \cdot \rho \cdot V} \cdot \psi. \quad (9)$$

Температуру поверхности торфа на конкретный момент времени можно определить по зависимости:

$$\Delta T_{\Pi} = (T_{окр} - T_{\Pi}) \cdot \exp(-m_{ox} \cdot \tau) \text{ К}, \quad (10)$$

где $T_{окр}$ – температура окружающей среды, принимаемая на конкретный момент времени, К; T_{Π} – температура поверхности образца торфа, задаваемая на начало расчета, К; τ – интервал времени, с.

Окислительные процессы экзотермичны, поэтому происходит саморазогрев вещества, в данном случае – образцов торфа. Залежи торфа представляют собой неподвижную массу, в которой создаются затрудненные условия для теплоотвода от центра скопления реагирующего вещества, и поэтому при достаточном количестве окислителя очаг тления возникает в нем, что подтверждается проведенными нами экспериментальными исследованиями.

Условием самовозгорания является равенство скорости тепловыделения и теплоотвода. Скорость охлаждения центра торфяного скопления пропорциональна разности температур теплофизического центра и окружающей среды:

$$P = \Pi_o \cdot T_{\Pi}, \quad (11)$$

где P – скорость охлаждения, К/с; T_{Π} – разность температур теплофизического центра нагреваемого образца торфа и окружающей среды $T_{\Pi} - T_{окр}$, К; Π_o – темп охлаждения, с⁻¹.

Для слоя торфа или образца торфяной почвы, находящейся в контейнере, темп охлаждения можно записать как

$$\Pi_o = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot F}{C_p \cdot \rho \cdot V}, \quad (12)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К); F – поверхность торфяной почвы или контейнера, м²; C_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг К); ρ – объемная плотность торфа, кг/м³; V – объем торфяного образца или слоя, м³.

Математическую зависимость (2) можно записать в виде:

$$P = \frac{\psi \cdot \alpha \cdot F}{C_p \cdot \rho \cdot V} \cdot (T_{\Pi} - T_{окр}). \quad (13)$$

Возникновение процесса самовозгорания зависит от E – энергии активации торфа, изменяющейся в пределах 70-170 кДж/моль, которая определяется по зависимости:

$$E = R \cdot T_c \cdot (\ln C - \ln P_c), \text{ Дж/моль}, \quad (14)$$

где T_c – температура компенсации процесса самовозгорания, К; P_c – адиабатическая скорость самонагрева при температуре T_c , К/с; C – предэкспоненциальный множитель, К/с; R – универсальная постоянная, $R = k_B \cdot N_A$.

Предэкспоненциальный множитель определяется по зависимости:

$$C = \theta \cdot 2 \cdot 10^{11}, \text{ К/с}, \quad (15)$$

где θ – активная доля поверхности, в среднем для торфа $9,8 \cdot 10^{-7}$.

Скорость самонагрева описывается выражением:

$$P_c = C \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T}\right), \text{ К/с}. \quad (16)$$

Период самонагрева торфа τ_i представлен зависимостью:

$$\tau_i = \frac{R \cdot T_n^2}{E \cdot C} \cdot \exp\left(\frac{E}{R \cdot T_n}\right), \text{ с}, \quad (17)$$

где T_n – начальная температура, К.

Энергию активации вещества можно определить по зависимости:

$$E = E_0 + C \cdot \ln \theta, \quad (18)$$

где E_0 – минимальная энергия активации.

Минимальную энергию активации определяется по зависимости:

$$E_0 = 2200 - R \cdot T_x \cdot \ln \theta, \quad (19)$$

где T_x – температурный параметр распределения, для торфа ориентировочно принимаемый как $2,7 \cdot 10^3$.

Температуру центра контейнера с помещенным образцом торфа можно определить по зависимости:

$$\Delta T_{\Pi} = (T_{окр} - T_{\Pi}) \cdot \exp(-m_{ox} \cdot \tau_i). \quad (20)$$

Результаты и их обсуждение. Из проведенных экспериментальных исследований следует, что критические условия для самовозгорания создаются при равенстве температур поверхности и теплофизического центра торфяного образца.

Энергия активации образцов торфа E определялась методом подбора, путем подстановки значений в уравнения и сравнения полученных результатов с расчетными (табл. 2-3), откуда следует, что она коррелируется с экспериментальными данными в зависимости от содержания общего органического углерода в торфяной

Таблица 2. Результаты моделирования процесса самовозгорания образцов торфа и сравнения их с экспериментальными данным при плотности 0,3 г/см³

Table 2. Results of modeling the process of spontaneous combustion of peat samples and comparing them with experimental data at a density of 0.3 g/cm³

№	Маркировка образцов торфа <i>Marking of peat samples</i>	Содержание общего органического углерода, % <i>Content of total organic carbon, %</i>	Расчетное время по математической модели до самовозгорания, сут. <i>Estimated time according to the mathematical model before spontaneous combustion, days</i>	Экспериментальное время до самовозгорания, сут. <i>Experimental time to spontaneous combustion, days</i>	Энергия активации E кДж/моль <i>Activation energy E kJ / mol</i>
Тверская область / Tverskaya region					
1	T1	22,47	23	24	117,8
2	T2	66,0	18	17	52,1
3	T3	63,7	18	18	54,3
Рязанская область / Ryazanskaya region					
3	P1	10,4	29	30	150,6
4	P2	24,7	21	23	124,7
5	P3	55,0	22	21	57,4
Московская область / Moskovskaya region					
6	M1	19,8	27	26	123
7	M2	23,2	23	23	120,7
8	M3	60,1	20	19	57,2

Таблица 3. Результаты моделирования процесса самовозгорания образцов торфа и сравнения их с экспериментальными данным при плотности 0,5 г/см³

Table 3. Results of modeling the process of spontaneous combustion of peat samples and comparing them with experimental data at a density of 0.5 g/cm³

№	Маркировка образцов торфа <i>Marking of peat samples</i>	Содержание общего органического углерода, % <i>Content of total organic carbon, %</i>	Расчетное время по математической модели до самовозгорания, сут. <i>Estimated time according to the mathematical model before spontaneous combustion, days</i>	Экспериментальное время до самовозгорания, сут. <i>Experimental time to spontaneous combustion, days</i>	Энергия активации E кДж/моль <i>Activation energy E kJ / mol</i>
Тверская область / Tverskaya region					
1	T1	22,47	35	36	117,8
2	T2	66,0	26	25	52,1
3	T3	63,7	26	27	54,3
Рязанская область / Ryazanskaya region					
3	P1	10,4	45	45	150,6
4	P2	24,7	34	35	124,7
5	P3	55,0	32	32	57,4
Московская область / Moskovskaya region					
6	M1	19,8	41	40	123
7	M2	23,2	33	34	120,7
8	M3	60,1	27	28	57,2

почве. Из анализа результатов, представленных в таблицах 2-3, следует заключение о том, что математическую модель можно использовать для прогнозирования возникновения эффекта самовозгорания.

Выводы

1. Время до самовозгорания торфа зависит от его плотности, с повышением которой интервал увеличивается, что связано с повышением количества реагирующего вещества в единице объема и уменьшением в нем окислителя.

2. Предложенная математическая модель позволяет использовать ее в дальнейшем для разработки компьютерной программы составления

прогнозов возникновения торфяных пожаров на землях, вовлеченных в сельскохозяйственный оборот.

3. Возникновение самовозгорания торфяной почвы возможно в период вегетации сельскохозяйственных растений, когда верхний слой торфа обезвожен, поскольку большая часть энергии нагрева расходуется на испарение влаги, и по этой причине возникновение торфяного пожара становится возможным.

4. Высокое содержание органического углерода в торфяной почве повышает возможность возникновения на ней пожара ввиду эффекта самовозгорания, поскольку в данном случае торф обладает низкой энергией активации E.

Список использованных источников

1. Андропова А.В. Дисперсный состав и содержание химических элементов в аэрозолях приземного слоя атмосферы г. Москвы / А.В. Андропова, М.С. Артамонова, М.А. Иорданский, А.С. Гинзбург, И.Г. Гранберг и др. // Безопасность жизнедеятельности. 2010. № 9. С. 47-51.
2. Исаева Л.К. Оценка здоровья пожарных в связи с действием на органы дыхания токсичных продуктов горения / Л.К. Исаева, В.А. Сулименко, С.В. Сулименко, С.В. Соловьёв // Вестник Академии государственной противопожарной службы. 2005. № 3. С. 73-81.
3. Исаева Л.К. Исследование свойств торфа при разработке профилактических мер и способов тушения торфяных пожаров / Л.К. Исаева, А.Г. Власов, С.В. Соловьёв // Вестник Академии ГПС МЧС России. 2004. № 2. С. 52-60.
4. Исаева Л.К. Экологические последствия лесных и торфяных пожаров в Московской области в 2002-2009 годах / Л.К. Исаева, С.В. Соловьёв, В.А. Сулименко, С.А. Шилин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2010. № 3. С. 85-91.
5. Dietze E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., D€orfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminien_ e, L., Giesecke T., Jahns S., Karpinska-Kolaczek M., Kolaczek P., Lamentowicz M., Latalowa M., Marcisz K., Obremska M., Pedziszewsk A., Poska A., Rehfeld K., Stancikait M., Stivrins N., Swieta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vanniere B., Slowinski M. Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe // *Quat. Sci. Rev.* 2018. № 201. Pp. 44e56. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.005>
6. Дидманидзе О.Н. Результаты исследований температурного режима осушаемой торфяной почвы / О.Н. Дидманидзе, Е.П. Парлюк, А.В. Евграфов // *Агроинженерия.* 2023. Т. 25, № 1. С. 45-49. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-45-49. EDN: VDZKKJ.
7. Дидманидзе О.Н. Результаты исследований пожароопасности торфа в зависимости от степени его разложения на землях сельскохозяйственного назначения / О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов, Н.Н. Пуляев, А.С. Гузалов // *Природообустройство.* 2024. № 4. С. 26-33. DOI: 10.26897/1997-6011-2024-4-26-33. EDN: VPAVME.

References

1. Andronova A.V. Dispersed composition and content of chemical elements in aerosols of the surface layer of the atmosphere of Moscow / Andronova A.V., Artamonova M.S., Jordansky M.A., Ginzburg A.S., Granberg I.G. and others // *Safety of life.* 2010. No. 9. P. 47-51.
2. Isaeva L.K. Assessment of the health of firefighters in connection with the effect of toxic gorenje products on the respiratory system / Isaeva L.K., Sulimenko V.A., Sulimenko S.V., Soloviev S.V. // *Bulletin of the Academy of State Fire Service.* 2005. No. 3. P. 73-81.
3. Isaeva L.K., Vlasov A.G., Solovyov S.V. Investigation of peat properties in the development of preventive measures and methods of extinguishing peat fires // *Bulletin of the Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia.* 2004. No. 2. P. 52-60.
4. Isaeva L.K. Ecological consequences of forest and peat fires in the Moscow region in 2002-2009 / Solovyov S.V., Sulimenko V.A., Shilin S.A. // *Fires and emergencies: prevention, elimination.* 2010. No. 3. P. 85-91
5. Dietze E., Theuerkauf M., Bloom K., Brauer A., D€orfler W., Feeser I., Feurdean A., Gedminien_ e, L., Giesecke T., Jahns S., Karpinska-Kolaczek M., Kolaczek P., Lamentowicz M., Latalowa M., Marcisz K., Obremska M., Pedziszewsk A., Poska A., Rehfeld K., Stancikait_ e, M., Stivrins N., Swieta-Musznicka J., Szal M., Vassiljev J., Veski S., Wacnik A., Weisbrodt D., Wiethold J., Vanniere B., Slowinski M., 2018. Holocene fire activity during low-natural flammability periods reveals scale-dependent cultural human-fire relationships in Europe. *Quat. Sci. Rev.* 201, 44e56. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.10.005>
6. Didmanidze O.N., Parlyuk E.P., Evgrafov A.V. Results of studies of the temperature regime of drained peat soil // *Agroengineering.* 2023. Vol. 25, No. 1. P. 45-49. DOI: 10.26897/2687-1149-2023-1-45-49. EDN: VDZKKJ.
7. Didmanidze O.N., Yevgrafov A.V., Pulyaev N.N., Guzalov A.S. Results of studies of peat fire hazard depending on the degree of its decomposition on agricultural lands // *Prirodoobustrojstvo.* 2024. No. 4. P. 26-33. DOI 10.26897/1997-6011-2024-4-26-33. EDN VPAVME.
8. Didmanidze O.N. Influence of peat soil density on the occurrence of landscape fires / O.N. Didmanidze, A.V. Evgrafov // *Prirodoobustrojstvo.* 2022. No. 4. P. 37-41. DOI 10.26897/1997-6011-2022-4-37-41. EDN AQHMQU.

8. Дидманидзе О.Н. Влияние плотности торфяных почв на возникновение ландшафтных пожаров / О.Н. Дидманидзе, А.В. Евграфов // Природообустройство. 2022. № 4. С. 37-41. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-4-37-41. EDN: AQNHMQU.

9. Киселев Я.С. Физические модели горения в системе пожарной безопасности. Монография / Я.С. Киселев, О.А. Хорошилов, Ф.В. Демехин / МЧС России; Санкт-Петербургский государственный университет противопожарной службы. СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2009. 347 с.

10. Борисов А.А. Кинетические характеристики низкотемпературного горения торфа / А.А. Борисов, Я.С. Киселев, Удилов В.П. // Теплофизика лесных пожаров. Новосибирск: ИТФСО АН СССР, 1984. С. 23-30.

11. Гедрайтите В.А. Торф и его свойства // Материалы Молодежной научной конференции «Проблемы естествознания»: Труды Томского государственного университета. Томск, 2010. Вып. 2. Т. 273. С. 33-35.

Об авторах

Отари Назирович Дидманидзе, академик РАН, д-р. техн. наук., профессор; ORSID: 0000-0003-2558-0585; AuthorID: 311972; didmanidze@rgau-msha.ru

Алексей Владимирович Евграфов, д-р. техн. наук., доцент; ORSID: 0000-0002-2313-2191, AuthorID: 828739; labpoliv@list.ru

Николай Николаевич Пуляев, канд. техн. наук., доцент; ORSID: 0000-0001-8984-4426; AuthorID: 416620; pulyaev@rgau-msha.ru

Артёмбек Сергеевич Гузалов, канд. техн. наук.; ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988

Алексей Викторович Куриленко, ассистент; ORCID: 0000-0003-3661-1121, AuthorID: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Authorship criteria

Дидманидзе О.Н., Евграфов А.В., Гузалов А.С. Пуляев Н.Н., Куриленко А.В. выполнили экспериментальные и теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов / The authors declare that there are no conflicts of interests

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.12.2024

Одобрена после рецензирования / Approved after peer review 10.01.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 10.01.2025

9. Kiselev Ya.S., Khoroshilov O.A., Demekhin F.V. Physical models of gorenje in the fire safety system: a monograph / EMERCOM of Russia; Saint Petersburg State University of Fire Service. SPb.: Publishing House of the Polytechnic University, 2009. 347 p.

10. Borisov A.A. Kinetic characteristics of low-temperature peat combustion / A.A. Borisov Ya.S. Kiselev, Udilov V.P. // Thermophysics of forest fires. Gorenje. Novosibirsk: ITF SOAN USSR, 1984. pp. 23-30.

11. Gedraitite V.A. Peat and its properties // Materials of the International Scientific Conference "Problems of Natural Science". Issue 2. Tomsk: 2010. P. 33-35.

About the authors

Otari N. Didmanidze, RAS academician, DSc (Eng), professor; ORSID: 0000-0003-2558-0585; AuthorID: 311972; didmanidze@rgau-msha.ru

Alexander V. Evgrafov, DSc (Eng), associate professor; ORSID: 0000-0002-2313-2191, AuthorID: 828739; labpoliv@list.ru

Nikolai N. Pulyaev, CSc (Eng), associate professor; ORSID: 0000-0001-8984-4426; AuthorID: 416620; pulyaev@rgau-msha.ru

Artembek S. Guzalov, CSc (Eng); ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988; ORSID: 0000-0003-3526-4332, AuthorID: 1036988

Alexey V. Kurilenko, assistant; ORCID: 0000-0003-3661-1121, AuthorID: 1099301; a.kurilenko@rgau-msha.ru

Didmanidze O.N., Evgrafov A.V., Guzalov A.S., Pulyaev N.N. carried out experimental and theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.