

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04>

УДК (UDC): 528.4, 630

Л. Ф. ЧОРНОГОР¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.,
завідувач кафедри космічної радіофізики
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

А. Н. НЕКОС¹, д-р геогр. наук, проф.,
завідувачка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
e-mail: alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

А. В. ТІТЕНКО¹, канд. геогр. наук, доц.,
директор навчально-наукового інституту екології
e-mail: titenko@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

Л. Л. ЧОРНОГОР¹,
студент навчально-наукового інституту екології
e-mail: L.L.Chornohor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
майдан Свободи 6, 61022, м. Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ

Актуальність. Існує нагальна потреба у виборі основних енергетичних, геометричних та теплофізичних параметрів лісових пожеж, а також оцінка основних параметрів цих пожеж, включаючи малодосліджені вогняні смерчі та хвильові процеси, викликані пожежами.

Мета. Розробити математичні моделі фізичних процесів, викликаних масштабними лісовими пожежами, оцінити основні параметри цих пожеж, включаючи малодосліджені вогняні смерчі та хвильові процеси, викликані пожежами.

Методи. Математичне моделювання, системний аналіз сукупності фізичних ефектів.

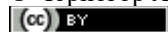
Результати. Викладено результати аналізу параметрів лісових пожеж і супутніх фізичних процесів, що викликаються великомасштабними пожежами. Запропоновано головні енергетичні, геометричні та теплофізичні параметри великомасштабних лісових пожеж. До них належать: енергія, потужність, тривалість, площа пожеж, а також довжина, інтенсивність та швидкість руху фронту горіння, густина потоку тепла, густина потоку потужності, висота смолоскипа, висота підйому терміку та диму, швидкість конвекції тощо. Створено прості аналітичні фізико-математичні моделі головних параметрів великомасштабних лісових пожеж. Запропоновано модель вогняного смерчу. Отримані співвідношення дозволяють оцінити головні параметри вогняних смерчів, що супроводжують великомасштабні лісові пожежі. До них належать радіус, кутова швидкість, тангенціальна швидкість, максимальна висота та швидкість підйому нагрітого утворення. Показано, що в залежності від розміру вихору параметри вогняного смерчу змінюються в широких межах. Наведені співвідношення дають можливість проаналізувати та оцінити головні параметри хвильових процесів, що генеруються лісовими пожежами. Такими параметрами є енергія, відносна доля енергії, діапазон періодів акустичного випромінювання тощо. Розраховано головні параметри лісових пожеж і супутніх фізичних процесів. Показано, що залежно від площі пожежі, ці параметри змінюються в широких межах.

Висновки. Розроблено математичні моделі фізичних процесів, викликаних масштабними лісовими пожежами, за допомогою яких проведено розрахунки параметрів основних ефектів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: великомасштабна лісова пожежа, енергетичні параметри, геометричні параметри, теплофізичні параметри, вогняний смерч, висота підйому терміку, швидкість конвекції, акустичне випромінювання

Як цитувати: Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л. Моделювання параметрів великомасштабних лісових пожеж. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 26. С.43-54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04>

© Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л., 2022



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

In cites: Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2022). Simulation of large-scale forest fire parameters. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Ecology»*, (26), 43-54. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04> (in Ukrainian)

Вступ

Лісові пожежі – справжнє стихійне лихо. Щорічно пожежами знищується близько 700 тис. га лісу та 30 млн м³ деревини. Добре відомо, що ліс повністю відновлюється протягом не менше 100 років. Частота пожеж (близько 7 млн на рік у даній час) і їх інтенсивність має тенденцію до збільшення. Швидше за все це пов'язано з глобальним потеплінням. З іншого боку пожежі прискорюють процес глобального потепління. Таким чином, між пожежами та глобальним потеплінням існує позитивний зворотний зв'язок. Враховуючи сказане, актуальним завданням є кількісний опис та математичне моделювання фізичних ефектів великомасштабних лісових пожеж. Це необхідно для оцінки збитків, що завдаються планеті, оцінки соціальних, економічних та екологічних наслідків.

Проблема лісових пожеж досліджується давно [1]. Робляться спроби їх прогнозування, і навіть математичного моделювання. Ця проблема залишається актуальною і на сьогодні [2–15]. Водночас залишається невирішеною низка питань, які розглядаються у цій роботі. Існує нагальна потреба у виборі основних енергетичних, геометричних та теплофізичних параметрів лісових пожеж, а також оцінка основних параметрів цих пожеж, включаючи малодосліджені вогняні смерчі та хвильові процеси, викликані пожежами.

Мета роботи – розробити математичні моделі фізичних процесів, викликаних масштабними лісовими пожежами, оцінити основні параметри цих пожеж, включаючи малодосліджені вогняні смерчі та хвильові процеси, викликані пожежами.

Параметри лісових пожеж

Енергетичні параметри. Основним параметром пожежі є енергія E (кількість тепла), що виділяється під час горіння матеріалів [16, 17]. У свою чергу, енергія залежить від питомої енергії згорання (теплотворної здатності) q , питомої маси горючих матеріалів \tilde{m} і площі пожежі S . Середня потужність процесу горіння визначається як енергією E , так і тривалістю Δt . При цьому справедливі такі співвідношення:

$$E = q\tilde{m}S, \\ P = \frac{dE}{dt} \approx \frac{E}{\Delta t} = q\mu S,$$

де $\mu = d\tilde{m} / dt \approx \tilde{m} / \tau$ – швидкість вигорання, τ – середня тривалість горіння матеріалів.

Площа, охоплена пожежею, залежить від довжини фронту горіння l_f і швидкості руху фронту горіння w . Інтенсивність горіння I визначається густиною потоку тепла Π та потужності Π_p :

$$I = \Pi w = q\tilde{m}w = qi,$$

де $i = \tilde{m}w$ – приплив горючих матеріалів,

$$\Pi = \frac{E}{S} = q\tilde{m}.$$

Аналогічно

$$\Pi_p = \frac{P}{S} = q\mu.$$

Наведені вище параметри змінюються в дуже широких межах. Так, площа лісових пожеж може досягати 10¹⁰ м², теплотворна здатність $q \approx (0,5-2) \cdot 10^7$ Дж/кг, питома вага $\tilde{m} \approx 0,1-1$ кг/м² для підстилаючої поверхні, $\tilde{m} \approx 1-3$ кг/м² для кущів, $\tilde{m} \approx 10-60$ кг/м² для лісів. Типові значення $\tau \approx 10^3-10^4$ с, $\mu \approx 10^{-3}-6 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с), $\Pi \approx 5 \cdot 10^5-10^9$ Дж/м², $\Pi_p \approx 5 \cdot 10^3-10^5$ Вт/м², $w \approx 0,1-10$ м/с, $i \approx 0,1-600$ кг/(м·с), $I \approx 5 \cdot 10^4-10^{10}$ Вт/м.

Геометричні та теплофізичні параметри. Крім названих геометричних параметрів S і w , введемо інші параметри. До них відносяться довжина фронту горіння l_f , висота полум'я h_f , висота диму h , висота підйому продуктів горіння (висота терміку) z_t .

Довжина фронту горіння l_f залежить від конфігурації лісового масиву, швидкості та напрямку вітру, наявності горючих

матеріалів, їх стану та може досягати десятків кілометрів.

Висота смолоскипа. Висота полум'я залежить від потоку сили плавучості

$$\Pi_f = g\delta W, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння, $\delta = (\rho_0 - \rho) / \rho_0 = 1 - T_0 / T$, ρ і ρ_0 – густина нагрітого та фонового повітря, T та T_0 – температура нагрітого та фонового повітря,

$$W = \frac{Sv_f}{2\pi}. \quad (2)$$

Тут v_f – швидкість відтоку продуктів горіння. Відповідно до роботи [16],

$$h_f = k_f W^{3/5} \Pi_f^{-1/5}, \quad (3)$$

де k_f – емпіричний коефіцієнт. Для нафтопродуктів $k_f \approx 8,3$. Для лісових пожеж також покладемо $k_f \approx 8,3$.

З (1), (2) та (3) випливає, що

$$h_f = k_f \left(\frac{W^2}{g\delta} \right)^{1/5} = k_f \left(\frac{S^2 v_f^2}{4\pi^2 g\delta} \right)^{1/5}. \quad (4)$$

При $k_f \approx 4$, $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$, $\delta \approx 0,7$, з (4) при $v_f \approx 0,56 \text{ м/с}$ [16] маємо:

$$h_f \approx 2,15S^{2/5}, \quad (5)$$

де h_f і S вимірюються м і м^2 відповідно.

Висота підйому диму. Висоту, на яку дим піднімається за час t , можна оцінити зі співвідношення [16]:

$$h_s = \frac{2}{\sqrt{v_t}} t \left(\frac{\Pi_f w}{2L} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

Тут v_t – коефіцієнт турбулентної в'язкості, L – розмір пожежі. Врахуємо, що розмір L пов'язаний із площею пожежі співвідношенням

$$L = k_L S^{1/2}, \quad (7)$$

де в залежності від конфігурації пожежі k_L набуває значень від 3,5 до 4,5.

З (6), (7) та (1) з урахуванням (2) отримаємо

$$h_s = \frac{t}{\sqrt{v_t}} \left(\frac{g\delta S v_f w}{\pi L} \right)^{1/2} = t \left(\frac{g\delta S^{1/2} w}{\pi k_L v_t} \right)^{1/2}, \quad (8)$$

Зазвичай коефіцієнт v_t змінюється від 0,1 до 1 $\text{м}^2/\text{с}$. Вважаючи $w = 1 \text{ м/с}$, $v_t = 0,5 \text{ м}^2/\text{с}$ і $k_L = 4$, з (8) отримаємо, що

$$h_s \approx 1,05tS^{1/4}. \quad (9)$$

З (8) і (9) випливає, що швидкість підйому верхньої кромки диму

$$v_s = \frac{h_s}{t} = \left(\frac{g\delta S^{1/2} w}{\pi k_L v_t} \right)^{1/2} \approx 1,05S^{1/4}. \quad (10)$$

Тут v_s і S вимірюються в м/с та м^2 відповідно.

Висота підйому терміку. Висоту підйому гарячих продуктів горіння можна оцінити з наступного співвідношення, отриманого з міркувань розмірності:

$$z_t = C \left(\frac{Pt}{\varepsilon} \right)^{1/3}, \quad (11)$$

де P – потужність процесу горіння,

$$\varepsilon = C_p \rho_0 T_0,$$

C_p – питома теплоємність повітря при постійному тиску, C – емпірична стала. Далі покладемо $C \approx 10$.

З (11) випливає, що швидкість підйому терміку

$$v_t = \frac{dz_t}{dt} = \frac{C}{3} \left(\frac{P}{\varepsilon} \right)^{1/3} t^{-2/3}. \quad (12)$$

За $P = q\mu S$ з (11) та (12) маємо

$$z_t = C \left(\frac{q\mu S t}{\varepsilon} \right)^{1/3}, \quad (13)$$

$$v_t = \frac{C}{3} \left(\frac{q\mu S}{\varepsilon} \right)^{1/3} t^{-2/3}. \quad (14)$$

Вважаючи $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^5 \text{ Дж/м}^3$, $q = 10^7 \text{ Дж/кг}$, $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{с)}$, $C \approx 10$, з (13) та (14) отримаємо

$$z_t \approx 4,6(S t)^{1/3}, \quad (15)$$

$$v_t \approx 1,5S^{1/3} t^{-2/3}. \quad (16)$$

Тут усі параметри вимірюються у системі СІ.

Наприклад, за $S = 10^6 \text{ м}^2$, $t = 10^2 \text{ с}$ маємо $z_t \approx 2,1 \text{ км}$, а $v_t \approx 7 \text{ м/с}$.

Максимальна висота підйому терміку. З міркувань розмірності для висоти z_{tm} можна отримати такі співвідношення:

$$z_{tm} = C_m \left(\frac{PS^{3/4}}{\varepsilon(g\delta)^{1/2}} \right)^{1/4}$$

або

$$z_{tm} = C_m \left(\frac{q\mu S^{7/4}}{\varepsilon(g\delta)^{1/2}} \right)^{1/4}, \quad (17)$$

де C_m – емпірична стала.

Вважаючи в (17) $C_m \approx 50$,
 $q = 10^7$ Дж/кг, $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с),
 $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^5$ Дж/м³, $\delta \approx 0,7$, отримуємо:
$$z_{tm} \approx 22S^{7/16}. \quad (18)$$

За $S = 10^6$ м² маємо $z_{tm} \approx 9,3$ км.

Швидкість конвекції. Вона залежить від параметра плавучості $g\delta$, площі пожежі, швидкості вигорання матеріалу та дається наступним співвідношенням [16]:

$$v_c = \left(\frac{2\mu g \delta S^{1/2}}{\rho_0} \right)^{1/3}. \quad (19)$$

За $\mu \approx 4 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с), $\delta = 0,7$, $\rho_0 \approx 1,25$ кг/м³ із (19) маємо

$$v_c \approx 0,35S^{1/6}. \quad (20)$$

У цій та інших розрахункових формулах всі розмірності надаються системою СІ. Наприклад, за $S = 10^6$ м² із співвідношення (20) отримуємо $v_c \approx 3,5$ м/с.

Вогняні смерчі. Протягом сильних лісових пожеж у ряді випадків виникають вогняні колонкоподібні структури, що зовні схожі на смерчі або заповнені вихори. Їх називають вогняними смерчами (вогняними штормами, вогняними торнадо). Вогняні смерчі виникають внаслідок злиття багатьох локальних пожеж. Виникає стовп полум'я радіусом R та висотою h_f , який практично не переміщується та існує до повного вигорання горючих матеріалів. Для виникнення вогняного смерчу необхідне початкове закручування полум'я, утворення початкового вихору, яке супроводжується конвекцією нагрітого газу зі швидкістю v_z .

Прикладом вогняного смерчу може бути смерч, що спостерігався під час лісових пожеж у Каліфорнії влітку 2020 р. (рисунок).

Незважаючи на значні зусилля [18], строгої теорії вогняних смерчів не існує. Проводиться лабораторне моделювання вогняних смерчів. Встановлено, що їхнє формування не залежить від способу їхньої генерації та типів горючих матеріалів і визначається значенням густини потоку потужності P_r та кутовою швидкістю обертання ω . Висота смерчу h_f приблизно на порядок перевищує його радіус R .

Розглянемо конвективний підйом нагрітого повітря (полум'я) над осередком пожежі.

Як і в роботах [19–21], у якості вихідних виберемо рівняння руху маси m терміку

об'ємом V і густиною ρ рівняння для швидкості зміни маси нагрітого утворення за рахунок приєднання холодного повітря та рівняння швидкості зміни повного інтеграла плавучості F :

$$m \frac{dv}{dt} = F_A - mg - \frac{C_D}{2} \rho_0 v^2 S_0, \quad (21)$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha S_1 v \rho_0, \quad (22)$$

$$\frac{dF}{dt} = -N^2 v V, \quad (23)$$

де v – швидкість руху маси повітря в терміці, $F_A = \rho V g$ – сила Архімеда, S_0 – площа поперечного перерізу терміку, ρ_0 – густина холодного повітря, $C_D \approx 1$ – ефективний коефіцієнт опору, g – прискорення вільного падіння, $\alpha \approx 0,1$ – коефіцієнт захоплення холодного повітря, S_1 – площа терміку, що взаємодіє з холодним повітрям, $N \approx 10^{-2}$ с⁻¹ – коефіцієнт Брента–Вайсяля [19–21].

Нагріте утворення будемо моделювати циліндром з незмінним радіусом R , який визначається радіусом теплового джерела і висотою h , що поступово збільшується. Температуру утворення (вогняного смерчу) будемо вважати незалежною від часу та висоти і рівною $T \approx 1000$ К. Температура навколишнього повітря $T_0 \approx 300$ К. Тоді

$$\pi F = g \vartheta V, \quad S_0 = \pi R^2,$$

$$V = S_0 h,$$

де $\vartheta = (T - T_0) / T_0$, T – температура повітря у терміку, T_0 – температура холодного повітря. Площа S_1 визначається площею бічної поверхні та площею верхньої основи циліндра:

$$S_1 = \pi R^2 + 2\pi R h = \pi R (R + 2h).$$

Врахуємо також те що, що $\rho = \rho_0 / (1 + \vartheta)$. Тоді з (21)–(23) отримаємо таку систему рівнянь:

$$\frac{dv}{dt} = \vartheta g - \beta (1 + \vartheta) \frac{v^2}{h}, \quad \beta = \frac{C_D}{2}, \quad v(0) = 0, \quad (24)$$

$$\frac{dh}{dt} = \alpha v (1 + \vartheta) \left(1 + \frac{2h}{R} \right), \quad h(0) = h_0. \quad (25)$$

Рівняння (24) та (25) повністю визначають динаміку підйому терміку.

Спочатку оцінимо характерні часи зміни функцій v та h . Ці часи за $2h_0 / R \ll 1$ даються такими співвідношеннями:



Рис. – Вогняний смерч під час лісової пожежі у Каліфорнії влітку 2020 р. [<https://time.com/96117/firenado/>]

Fig. – Tornado of fire during a forest fire in California in the 2020 summer [<https://time.com/96117/firenado/>]

$$t_v = \frac{h_0}{\beta(1+\vartheta)v},$$

$$t_h = \frac{1}{1+\vartheta} \frac{h_0}{\alpha v}.$$

Відношення

$$\frac{t_v}{t_h} = \frac{\alpha}{\beta}$$

завичай мале за рахунок малості $\alpha \approx 0,1$. Це означає, що у рівнянні (24) за $t \ll t_h$ маємо $h(t) \approx h_0$, а

$$v(t) \approx v_0 = \sqrt{\frac{\vartheta g h_0}{\beta(1+\vartheta)}}.$$

Тоді за $h_0 \approx 10$ м, $\vartheta \approx 7/3$ та $\beta \approx 1/2$ для вертикальної швидкості маємо $v_0 \approx 12$ м/с.

За $t > t_h$

$$v(t) = \sqrt{\frac{\vartheta}{\beta(1+\vartheta)} g h(t)}, \quad (26)$$

тобто $v(t)$ адиабатично підлаштовується під залежність $h(t)$.

З (25) з урахуванням (26) маємо таке співвідношення для $h(t)$:

$$\frac{dh}{dt} = \alpha(1 + \vartheta) \left(1 + \frac{2h}{R} \right) \sqrt{\frac{\vartheta}{\beta(1 + \vartheta)}} gh,$$

$$h(0) = h_0. \quad (27)$$

Розв'язок (27) має вигляд

$$h = \frac{R}{2} \left(\frac{1 + y_0 \operatorname{tg}(t/t_0)}{y_0 - \operatorname{tg}(t/t_0)} \right)^2, \quad (28)$$

де $y_0 = \sqrt{R/2h_0}$, а характерний час підйому

$$t_0 = \sqrt{\frac{2\beta R}{\alpha^2 \vartheta(1 + \vartheta)g}}.$$

З (28) випливає, що h необмежено зростає за $t \rightarrow t_0 \arctg y_0$. Насправді, цього не відбувається, оскільки модель, що розглядається, не враховує убування густини газу з висотою і немонотонність висотної залежності T_0 . Час підйому полум'я $t_m \leq \pi t_0/2$. При $R = 10 - 10^3$ м значення $t_0 \approx 3,6-36$ с, а $t_m < \pi t_0/2 \approx 5,63-56,3$ с. Результати розрахунку t_0 залежно від R наведено у табл. 2.

Строго кажучи, співвідношення (28) визначає висоту підйому нагрітих продуктів горіння, яка априорі більше $h(t_m)$.

Для оцінки h_m скористаємося співвідношенням (4):

$$h_m = k_f \left(\frac{S_0^2 v_m^2}{4\pi^2 g \delta} \right)^{1/5},$$

де $S_0 = \pi R^2$,

$$v_m^2 = v^2(t_m) = \frac{\vartheta}{\beta(1 + \vartheta)} gh_m.$$

Тоді

$$h_m = k_f^{5/4} \left(\frac{\vartheta}{4\delta(1 + \vartheta)} \right)^{1/4} R.$$

За $k_f \approx 8,3$, $\vartheta \approx 7/3$ маємо $h_m \approx 10R$,

$$v_m \approx \sqrt{\frac{10\vartheta}{\beta(1 + \vartheta)}} gR \approx 12\sqrt{R},$$

де v_m – в м/с, а R – в м.

Відповідно до робіт [27, 28, 30], для кутової швидкості обертання вогняного смерчу справедливе наступне співвідношення:

$$\omega = \frac{a}{R} \sqrt{2gh\vartheta}, \quad (29)$$

де a – емпірична константа. Її можна оцінити з даних пожежі в Австралії, згаданої у роботах [27, 28, 30]. При $\omega \approx 0,48$ с⁻¹, $h \approx 10R$, $R \approx 50$ м, $\vartheta \approx 7/3$ маємо $a \approx 0,16$. Тангенціальна швидкість у вихорі

$$v_t = \omega R, \quad (30)$$

а період обертання вихору

$$T_\omega = \frac{2\pi}{\omega}. \quad (31)$$

Розглянемо далі густину потоку тепла Q у вогняному смерчі

$$\Pi_Q = C\rho(T - T_0)v_0 = C\rho_0 T_0 \frac{\vartheta}{1 + \vartheta} v_0,$$

де $C \approx 10^3$ Дж/(кг·К) – питома теплоємність повітря, $\rho_0 \approx 1,3$ кг/м³. За $\vartheta \approx 7/3$, $v_0 \approx 12$ м/с та $T_0 \approx 300$ К маємо $\Pi_Q \approx 3,3 \cdot 10^6$ Вт/м². Вогняні смерчі формуються за $\Pi_{Q\min} \approx 10^4$ Вт/м².

Параметри хвильових процесів. Такими параметрами є енергія та діапазон періодів акустичного випромінювання.

Енергія акустичного випромінювання. Пожежі є потужним джерелом акустичного випромінювання у широкому діапазоні частот.

Оцінку енергії акустичного випромінювання можна отримати, виходячи з наступного співвідношення:

$$E_a = \frac{\operatorname{tg}\beta}{h_f v_s} \left(\frac{\pi g}{\varepsilon} \right)^{1/2} P^{3/2} \omega_B^{-3/2},$$

де β – кут розгортання полум'я, $\omega_B \approx 5,7 \cdot 10^{-2}$ с⁻¹ – частота Брента-Вайсяля, v_s – швидкість звуку. Для масштабних пожеж $\operatorname{tg}\beta$ слід замінити на 1, тобто:

$$E_a \approx \frac{1}{h_f v_s} \left(\frac{\pi g}{\varepsilon} \right)^{1/2} P^{3/2} \omega_B^{-3/2}. \quad (32)$$

З співвідношення (32) випливає, що $P \sim S^{3/2}$, а з рівнянь (4) і (5) видно, що $h_f \sim S^{2/5}$. Тоді $E_a \sim S^{11/10}$, а акустична ефективність

$$\eta_a = \frac{E_a}{E} \propto S^{1/10},$$

тобто, η_a практично залежить від площі пожежі.

Вважаючи, згідно (5), $h_f \approx S^{2/5}$, $v_s \approx 330$ м/с, $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^5$ Дж/м³, з (32) за $q = 10^7$ Дж/кг, $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с) отримаємо, що

$$E_a \approx 1,56 \cdot 10^4 S^{11/10}. \quad (33)$$

Наприклад, за $S = 10^6$ м² маємо $E_a \approx 6,2 \cdot 10^{10}$ Дж, а $E = 10^{14}$ Дж. При цьому $\eta_a \approx 6,2 \cdot 10^{-4} \approx 0,06\%$. Результати спостережень дали $\eta_a \approx 0,05\%$ [16].

Діапазон періодів акустичного випромінювання. Періоди випромінювання, що

генеруються пожежами, обговорюються в роботі [16].

Можна виділити чотири діапазони.

1. Акустичні коливання, пов'язані з пульсаціями нагрітого повітря в полум'ї. Характерний період T дається таким співвідношенням [16]:

$$T_1 \approx 0,1 \left(\frac{S^2}{\dot{\Gamma}} \right)^{1/3}, \quad (34)$$

де параметр

$$\dot{\Gamma} = \frac{q\mu Sg}{2\pi\varepsilon}, \quad (35)$$

званий запасом плавучості в нагрітому струмені.

З (34) та (35) маємо

$$T_1 = 0,1 \left(\frac{2\pi\varepsilon S}{q\mu g} \right)^{1/3}. \quad (36)$$

Важливо, що $T_1 \sim S^{1/3}$. Наприклад, при $q = 10^7$ Дж/кг, $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с) та $\varepsilon \approx 4 \cdot 10^5$ Дж/м³ (36) отримуємо, що

$$T_1 \approx 0,19 S^{1/3}. \quad (37)$$

Для $S = 10^6$ м² період $T_1 \approx 19$ с.

2. Акустичні коливання, пов'язані з періодичним рухом конвективного струменя

біля висоти зависання продуктів горіння. У цьому випадку період

$$T_2 = \frac{2\pi}{\omega_B} \approx 110 \text{ с.}$$

3. Акустичні (акустико-гравітаційні) коливання, пов'язані зі зривом вихорів із флангів конвективної колонки у полі вітру. Для періоду справедливе таке співвідношення:

$$T_3 = St \frac{L}{v_w} \approx St \frac{k_L \sqrt{S}}{v_w}, \quad (38)$$

де $St \approx 4,76$ – число Струхала, v_w – швидкість вітру. За $S = 10^6$ м², $v_w = 10$ м/с маємо $T_3 \approx 1900$ с.

4. Акустичні (акустико-гравітаційні) коливання, пов'язані з кінцевою тривалістю пожежі Δt . В цьому випадку

$$T_4 = \Delta t = \tau + \frac{L}{w} = \tau + \frac{k_L \sqrt{S}}{w}. \quad (39)$$

Наприклад, при $\tau \approx 3 \cdot 10^3$ с, $k_L = 4$, $S = 10^6$ м² та $w = 1$ м/с маємо $T_4 \approx 7 \cdot 10^3$ с.

Результати розрахунків

Результати розрахунків основних параметрів великомасштабних лісових пожеж і супутніх їм фізичних процесів наведено у табл. 1. Як незалежний параметр обрана площа лісу, охоплена вогнем. При розрахунках використані співвідношення для E , P , а також рівняння (5), (10), (18), (20), (33), (37), (38) та (39). З табл. 1 видно, що при значній зміні площі пожежі всі параметри варіюють дуже істотно. Найбільше змінюються енергетичні характеристики (E , P та E_a). Швидкість підйому продуктів горіння може досягати багатьох десятків метрів за секунду. У той же час швидкість конвекції змінюється від $\sim 0,1$ до ~ 10 м/с. Висота полум'я могла збільшуватися до ~ 1 – 10 км лише у разі виникнення вогняного смерчу (вогняного торнадо).

Результати розрахунку параметрів вогняного смерчу з використанням співвідношень (26), (28) – (31) наведено в табл. 2. З табл. 2 видно, що при збільшенні радіусу смерчу всі параметри (крім ω) швидко

збільшуються. Швидкість обертання може досягати багатьох десятків метрів за секунду, швидкість підйому – навіть сотень метрів за секунду, висота – багатьох кілометрів, а період обертання – десятків секунд. Зауважимо, що швидкість $v \approx 380$ м/с не перевищує швидкість звуку в полум'ї, де вона близька до 620 м/с.

Періоди коливань повітря змінюються від інфразвукового (менше ~ 300 с) до гравітаційних коливань (від 5 хв до 3 год). Додамо, що інфразвукові хвилі, майже не загасаючи, поширюються практично в глобальних масштабах. Вони не відчуються вухами людини, проте діють на її організм, викликаючи страх, галюцинації, нервовий розлад тощо. Інфразвукові хвилі діють на флору та фауну в цілому.

Проведені розрахунки дозволяють оцінити порядок основних параметрів великомасштабних лісових пожеж і супутніх фізичних

Таблиця 1

Залежність головних параметрів горіння лісових масивів від площі, охопленої пожежею

Table 1

Dependence of the main parameters of forest burning on the area covered by fire

| Площа пожежі, м ² | 1 | 10 ² | 10 ⁴ | 10 ⁶ | 10 ⁸ | 10 ¹⁰ |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Енергія пожежі, ТДж | 10 ⁻⁴ | 10 ⁻² | 1 | 10 ² | 10 ⁴ | 10 ⁶ |
| Потужність пожежі, ГВт | 4·10 ⁻⁵ | 4·10 ⁻³ | 0,4 | 40 | 4·10 ³ | 4·10 ⁵ |
| Висота факелу, м | 2,2 | 13,5 | 85,6 | 540 | 3,4·10 ³ | 2,2·10 ⁴ |
| Швидкість підйому диму, м/с | 1,05 | 3,36 | 10,5 | 33,2 | 105 | 331,8 |
| Максимальна висота терміку, м | 22 | 165 | 1237 | 9,3·10 ³ | – | – |
| Швидкість конвекції, м/с | 0,35 | 0,75 | 1,6 | 3,5 | 7,5 | 16,2 |
| Акустична енергія, ГДж | 1,56·10 ⁻⁵ | 2,47·10 ⁻³ | 0,39 | 62 | 9,8·10 ³ | 1,56·10 ⁶ |
| Період T ₁ , с | 0,19 | 0,88 | 4,1 | 19 | 88 | 408 |
| Період T ₃ , с | 1,9 | 19 | 1,9·10 ² | 1,9·10 ³ | – | – |
| Період T ₄ , с | 3·10 ³ | 3,04·10 ³ | 3,4·10 ³ | 7·10 ³ | – | – |

Таблиця 2

Залежність головних параметрів вогняного смерчу від його радіусу

Table 2

Dependence of the main parameters of a fiery tornado on its radius

| Радіус, м | 10 | 20 | 30 | 50 | 100 | 200 | 300 | 500 | 1000 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Кутова частота, с ⁻¹ | 1,1 | 0,77 | 0,62 | 0,48 | 0,34 | 0,24 | 0,20 | 0,15 | 0,11 |
| Період, с | 5,7 | 8,2 | 10,1 | 13,0 | 18,5 | 26,2 | 31,4 | 41,9 | 57 |
| Тангенціальна швидкість, м/с | 10,8 | 15,3 | 18,7 | 24,2 | 34,2 | 48,4 | 59,2 | 78,5 | 108 |
| Максимальна швидкість підйому, м/с | 38 | 54 | 66 | 85 | 120 | 170 | 208 | 268 | 380 |
| Максимальна висота, км | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 1 | 2 | 3 | 5 | 10 |
| Характерний час підйому, с | 3,6 | 5,1 | 6,2 | 8,0 | 11,3 | 16,0 | 19,6 | 25,4 | 36 |

процесів. Це необхідно для оцінки економічної шкоди від великомасштабних лісових пожеж та екологічного стану екосистем.

Потрібні подальші теоретичні та експериментальні дослідження в галузі фізики й екології великомасштабних лісових пожеж.

Обговорення

У роботі розроблено прості аналітичні моделі, що дозволяють оцінювати основні енергетичні, геометричні та теплофізичні параметри великомасштабних пожеж. Особливо розглянуто особливості вогняних смерчів. Оцінено основні параметри хвильових

процесів, що генеруються пожежами. Наведені у роботі співвідношення мають різну точність. Низка із них дозволяє розрахувати лише порядок величини, інші мають прийнятну похибку. Такий стан в даній галузі науки на сьогоднішній день.

Висновки

1. Запропоновані головні енергетичні, геометричні та теплофізичні параметри великомасштабних лісових пожеж дозволяють проаналізувати та оцінити масштаби економічних, соціальних та екологічних наслідків

цих стихійних лих. Створено прості аналітичні фізико-математичні моделі головних параметрів великомасштабних лісових пожеж.

2. Запропоновано модель вогняного смерчу. Отримані співвідношення дозволя-

ють оцінити головні параметри вогняних смерчів, що супроводжують великомасштабні лісові пожежі. Показано, що в залежності від розміру вихору параметри вогняного смерчу змінюються в широких межах.

3. Наведені співвідношення дають можливість проаналізувати та оцінити головні

параметри хвильових процесів, що генеруються лісовими пожежами.

4. Проведений розрахунок головних параметрів лісових пожеж і супутніх фізичних процесів показало, що залежно від площі пожежі, ці параметри змінюються в широких межах.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Буц Ю.В. Науково-методологічні основи релаксації екогеосистем при техногенному навантаженні пірогенного походження: дис. ... д-ра техн. наук. Суми: СумДУ, 2020. 399 с.
2. Chuviesco E., Pettinari M.L., Koutsias N., Forkel M., Hantson S., Turco M. Human and climate drivers of global biomass burning variability. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 779. id:146361. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146361>
3. Dowdy A.J., Ye H., Pepler A., Thatcher M., Osbrough S.L., Evans J.P., Di Virgilio G., McCarthy N. Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific reports*. 2019. Vol. 9, No 1. id: 10073. P. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>
4. Rodríguez Trejo D.A., Martínez Muñoz P., Martínez Lara P.J. Fire effects on the trees of a tropical pine forest and a tropical dry forest at Villaflores, Chiapas, Mexico. *Ciència Florestal*. 2019. Vol. 29, No 3. P. 1033–1047. <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
5. McLauchlan K.K., Higuera P.E., Miesel J., Rogers B.M., Schweitzer J., Shuman J.K., Tepley A.J., Varner J.M., Veblen T.T., Adalsteinsson S.A., Balch J.K., Baker P., Batllori E., Bigio E., Brando P., Cattau M., Chipman M.L., Coen J., Crandall R., Daniels L., Enright N., Gross W.S., Harvey B.J., Hatten J.A., Hermann S., Hewitt R.E., Kobziar L.N., Landesmann J.B., Lorant M.M., Maezumi S.Y., Mearns L., Moritz M., Myers J.A., Pausas J.G., Pellegrini A.F.A., Platt W.J., Roozeboom J., Safford H., Santos F., Scheller R.M., Sherriff R.L., Smith K.G., Smith M.D., Watts A.C. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*. 2020. Vol. 108, No 5. P. 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
6. Coogan S.C., Daniels L.D., Boychuk D., Burton P.J., Flannigan M.D., Gauthier S., Kafka V., Park J.S., Wotton B.M. Fifty years of wildland fire science in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. Vol. 51, No. 2. P. 283–302. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0314>
7. Hebert-Dufresne L., Pellegrini A.F.A., Bhat U., Redner S. Edge fires drive the shape and stability of tropical forests. *Ecology letters*. 2018. No 6. P. 794–803. <https://doi.org/10.1111/ele.12942>
8. Zhang G., Wang M., Liu K. Forest Fire Susceptibility Modeling Using a Convolutional Neural Network for Yunnan Province of China. *International Journal of Disaster Risk Science*. 2019. Vol. 10, No 3. P. 386–403. <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1>
9. Holuša J., Koreň M., Berčák R., Resnerová K., Trombik J., Vaněk J., Szczygieł R., Chromek I. A simple model indicates that there are sufficient water supply points for fighting forest fires in the Czech Republic. *International journal of wildland fire*. 2021. Vol. 30, No 6. P. 428–439. <https://doi.org/10.1071/WF20103>
10. Kelly A.J., Hodges K.E. Post-fire salvage logging reduces snowshoe hare and red squirrel densities in early seral stages. *Forest Ecology and Management*. 2020. Vol. 473. id: 118272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118272>
11. Adámek M., Jankovská Z., Hadincová V., Kula E., Wild J. Drivers of forest fire occurrence in the cultural landscape of Central Europe. *Landscape Ecology*. 2018. Vol. 33, No 11. P. 2031–2045. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0712-2>
12. Turner M.G., Brazionas K.H., Hansen W.D., Hoecker T.J., Rammer W., Ratajczak Z., Westerling A.L., Seidl R. The magnitude, direction, and tempo of forest change in Greater Yellowstone in a warmer world with more fire. *Ecological Monographs*. 2022. Vol. 92, No 1. id: e01485. <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>

13. Wilson N., Bradstock R., Bedward M. Detecting the effects of logging and wildfire on forest fuel structure using terrestrial laser scanning (TLS). *Forest Ecology and Management*. 2021. Vol. 488. id: 119037. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119037>
14. Черногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко Г.В., Черногор Л.Л. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2021. № 24. С. 79–90. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07>
15. Черногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко Г.В., Черногор Л.Л. Екологічні наслідки горіння лісових масивів у північній півкулі в 2020 р.: результати моделювання та кількісних розрахунків. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2021. № 25. С. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-04>
16. Черногор Л.Ф. Физика и экология катастроф: монография. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
17. Черногор Л.Ф. Космос, Земля, человек: актуальные проблемы. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2017. 384 с.
18. Snegirev A.Yu., Marsden J.A., Francis J., Makhviladze G.M. Numerical studies and experimental observations of whirling flames. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, No. 12–13. P. 2523–2539. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.002>
19. Черногор Л. Ф. Динамика конвективного подъема нагретых образований в атмосфере. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, №6. С. 626–634.
20. Черногор Л. Ф. Динамика конвективного подъема крупномасштабных слабо нагретых атмосферных образований. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2019. Т. 55, №3. С. 29–35.
21. Черногор Л. Ф. Динамика підйому терміків у атмосфері при безперервному підводі тепла: Приклади практичного застосування. *Фізика атмосфери та геокосмосу*. 2021. Т. 2, №1. С. 5–16. <https://doi.org/10.47774/phag.02.01.2021-1>
22. The Scariest Picture You’ll See All Day: A ‘Firenado’. (2022). Retrieved from <https://time.com/96117/firenado/>

Стаття надійшла до редакції 01.05.2022

Стаття рекомендована до друку 27.05.2022

L. F. CHERNOGOR¹, DSc (Physics and Mathematics), Professor
Head of the Department of Space Radio Physics

e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

A. N. NEKOS¹, DSc (Geography), Professor

Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education
e-mail: alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

G. V. TITENKO¹, PhD (Geography), Associate Professor,
Head of Karazin Institute of Environmental Sciences

e-mail: titenko@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

L. L. CHORNOHOR¹

Student of Karazin Institute of Environmental Sciences
e-mail: L.L.Chornohor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

¹V. N. Karazin Kharkiv National University,
Svobody Sq., 6, 61022, Kharkiv, Ukraine

SIMULATION OF LARGE-SCALE FOREST FIRE PARAMETERS

Topicality. There is an urgent need to select the main energy, geometric and thermophysical parameters of forest fires, as well as to assess the main parameters of these fires, including unexplored fire tornadoes and wave processes caused by fires.

Purpose. To develop mathematical models of physical processes caused by large-scale forest fires, evaluate the main parameters of these fires, including unexplored fire tornadoes and wave processes caused by fires.

Methods. Analytical review of the research problem, theoretical and computational, mathematical modeling, systematic analysis of the set of physical effects.

Results. The results of the analysis of the parameters of forest fires and related physical processes caused by large-scale fires are presented. The main energy, geometric and thermophysical parameters of large-scale forest fires are proposed. These include: energy, power, duration, area of fires, as well as the length, intensity and speed of the combustion front, heat flux density, power flux density, torch height, heat and smoke rise height, convection speed, etc. Simple analytical physical and mathematical models of the main parameters of large-scale forest fires have been created. A model of a fiery tornado is proposed. The obtained ratios allow us to estimate the main parameters of fire tornadoes that accompany large-scale forest fires. These include radius, angular velocity, tangential velocity, maximum height and rate of rise of the heated formation. It is shown that, depending on the size of the vortex, the parameters of the fiery tornado vary widely. These relationships make it possible to analyze and evaluate the main parameters of wave processes generated by forest fires. Such parameters are energy, relative share of energy, range of periods of acoustic radiation, etc. The main parameters of forest fires and related physical processes are calculated. It is shown that depending on the area of the fire, these parameters vary widely.

Conclusions. Mathematical models of physical processes caused by large-scale forest fires have been developed, by means of which the parameters of the main effects have been calculated.

KEYWORDS: large-scale forest fire, energy parameters, geometrical parameters, thermophysical parameters, fire tornado, thermal rise height, convection velocity, acoustic radiation

References

1. Buts, Yu. V. Scientific and methodological bases of relaxation of ecogeosystems under the technogenic loading of pyrogenic origin: Doctor's thesis. Sumy: Sumy State University. Retrieved from <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76266> (In Ukrainian)
2. Chuvieco, E., Pettinari, M.L., Koutsias, N., Forkel, M., Hantson, S., & Turco, M. (2021). Human and climate drivers of global biomass burning variability. *Science of the Total Environment*, 779, 146361. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146361>
3. Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., Thatcher, M., Osbrough, S.L., Evans, J.P., Di Virgilio, G., & McCarthy, N. (2019). Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific reports*, 9(1), 10073, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>
4. Rodríguez Trejo, D.A., Martínez Muñoz, P., & Martínez Lara, P.J. (2019). Fire effects on the trees of a tropical pine forest and a tropical dry forest at Villaflores, Chiapas, Mexico. *Ciência Florestal*, 29(3), 1033–1047. <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
5. McLauchlan, K.K., Higuera, P.E., Miesel, J., Rogers, B.M., Schweitzer, J., Shuman, J.K., Tepley, A.J., Varner, J.M., Veblen, T.T., Adalsteinsson, S.A., Balch, J.K., Baker, P., Batllori, E., Bigio, E., Brando, P., Cattau, M., Chipman, M.L., Coen, J., Crandall, R., Daniels, L., Enright, N., Gross, W.S., Harvey, B.J., Hatten, J.A., Hermann, S., Hewitt, R.E., Kobziar, L.N., Landesmann, J.B., Loranty, M. M., Maezumi, S.Y., Mearns, L., Moritz, M., Myers, J.A., Pausas, J.G., Pellegrini, A.F.A., Platt, W.J., Roozeboom, J., Safford, H., Santos, F., Scheller, R.M., Sherriff, R.L., Smith, K.G., Smith, M.D., & Watts, A.C. (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*, 108, (5), 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
6. Coogan, S.C., Daniels, L.D., Boychuk, D., Burton, P.J., Flannigan, M.D., Gauthier, S., Kafka, V., Park, J.S., & Wotton, B.M. (2021). Fifty years of wildland fire science in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(2), 283–302. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0314>
7. Hebert-Dufresne, L., Pellegrini, A.F.A., Bhat, U., & Redner, S. (2018). Edge fires drive the shape and stability of tropical forests. *Ecology letters*, (6), 794–803. <https://doi.org/10.1111/ele.12942>
8. Zhang, G., Wang, M., & Liu, K. (2019). Forest Fire Susceptibility Modeling Using a Convolutional Neural Network for Yunnan Province of China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 10(3), 386–403. <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1>
9. Holuša, J., Koreň, M., Berčák, R., Resnerová, K., Trombik, J., Vaněk, J., Szczygieł, R., & Chromek, I. (2021). A simple model indicates that there are sufficient water supply points for fighting forest fires in the Czech Republic. *International journal of wildland fire*, 30(6), 428–439. <https://doi.org/10.1071/WF20103>
10. Kelly, A.J., & Hodges, K.E. (2020). Post-fire salvage logging reduces snowshoe hare and red squirrel densities in early seral stages. *Forest Ecology and Management*, 473, 118272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118272>
11. Adámek, M., Jankovská, Z., Hadincová, V., Kula, E., & Wild, J. (2018). Drivers of forest fire occurrence in the cultural landscape of Central Europe. *Landscape Ecology*, 33(11), 2031–2045. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0712-2>
12. Turner, M.G., Braziunas, K.H., Hansen, W.D., Hoecker, T.J., Rammer, W., Ratajczak, Z., Westerling, A.L., & Seidl, R. (2022). The magnitude, direction, and tempo of forest change in Greater Yellowstone in a warmer world with more fire. *Ecological Monographs*, 92(1), e01485. <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>

13. Wilson, N., Bradstock, R., & Bedward, M. (2021). Detecting the effects of logging and wildfire on forest fuel structure using terrestrial laser scanning (TLS). *Forest Ecology and Management*, 488, 119037. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119037>
14. Chornohor, L.F., Nekos, A.N., Titenko, G.V., & Chornohor, L.L. (2021). Ecological consequences of large-scale forest fires in Ukraine in spring – summer – autumn 2020. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University series « Ecology»*, (24), 79–90. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07>
15. Chornohor, L.F., Nekos, A.N., Titenko, G.V., & Chornohor, L.L. (2021). Ecological consequences of forest burning in the northern hemisphere in 2020: results of modeling and quantitative calculations. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University series « Ecology»*, (25), 42–54. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-04>
16. Chernogor, L. F. (2012). *Physics and Ecology of Disasters*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian)
17. Chernogor, L. F. (2017). *Space, the Earth, Mankind: Contemporary Challenges*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian)
18. Snegirev, A. Yu., Marsden, J. A., Francis, J., & Makhviladze, G. M. (2004). Numerical studies and experimental observations of whirling flames. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12–13), 2523–2539. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.002>
19. Chernogor, L.F. (2018). Dynamics of the Convective Rise of Thermals in the Atmosphere. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 54(6), 626–634. <http://dx.doi.org/10.1134/S000143381806004X>
20. Chernogor, L.F. (2019). Dynamics of Convective Upwelling of Large-Scale Weakly Heated Atmospheric Aggregates. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 55(3), 251–256. <https://doi.org/10.1134/S0001433819020038>
21. Chernogor, L.F. (2021). Dynamics of the Thermal Uplifting in the Atmosphere under a Continuous Supply of Heat: Practical Application Examples. *Physics of the atmosphere and geospace*, 2(1), 5–16. <https://doi.org/10.47774/phag.02.01.2021-1>
22. The Scariest Picture You’ll See All Day: A ‘Firenado’ (2022) URL: <https://time.com/96117/firenado/>

The article was received by the editors 01.05.2022

The article is recommended for printing 27.05.2022