

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-04>

УДК (UDC): 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 географ. 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. географ. 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

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ОЦІНКИ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВПЛИВУ ПІРОГЕННОГО ФАКТОРУ НА ЛІСОВІ ЕКОСИСТЕМИ

Актуальність. Розробка простих аналітичних математичних моделей горіння великих лісових масивів край необхідних для оцінки екологічних наслідків впливу пірогенного фактору.

Мета. Розробити математичні моделі, що описують поширення великомасштабних лісових пожеж, спрямованих на оцінку екологічних наслідків впливу пірогенного фактору.

Методи. Математичне моделювання.

Результати. Надано результати аналізу основних параметрів горіння лісових масивів: площа, пройдена вогнем, тривалість пожежі, час вигорання, питома маса горючих матеріалів, енергія та потужність горіння, питома теплотворна здатність, інтенсивність горіння, швидкість переміщення фронту горіння, приплив горючих матеріалів тощо. Створено прості аналітичні математичні моделі протікання процесу горіння великих лісових масивів, а саме: модель з постійною швидкістю зростання площі пожежі, двовимірний модель, модель з секторним рухом фронту горіння, модель з лінійним зростанням у часі довжини фронту горіння, модель з квадратичним зростанням у часі швидкості зміни площі пожежі та узагальнена модель. Запропонована нова класифікація інтенсивності пожеж, що містить 1–7 балів від наднизької до екстремальної інтенсивності. Оцінено максимальну площу, охоплену пожежею, (10–100 тис. км²), енергію горіння (1–10 ЕДж) та потужність горіння (0.1–1 ПВт).

Висновки. Розроблено прості аналітичні математичні моделі протікання процесу горіння великих лісових масивів, необхідні для кількісної оцінки екологічних наслідків пожеж.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: математична модель, горіння лісового масиву, параметри горіння, класифікація інтенсивності пожеж

Як цитувати: Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Черногор Л. Л. Математичні моделі для оцінки екологічних наслідків впливу пірогенного фактору на лісові екосистеми. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2022. Вип. 27. С. 51 - 62. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-04>

In cites: Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2022). Mathematical models for estimate of the ecological consequences of the impact of the pyrogenic factor on forest ecosystems. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Ecology»*, (27), 51 - 62. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-04> (in Ukrainian)

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



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Вступ

Щорічно пожежі чисельністю до 7 млн. охоплюють до 3% земної суші [1]. Горять переважно лісові масиви. За рік пожежі знищують 700 тис. га лісу, 70 млн м³ деревини. Глобальне потепління призводитиме до збільшення ймовірності виникнення пожеж. У свою чергу, пожежі роблять свій внесок у глобальне потепління, а також формують суху та спекотну погоду. Справа в тому, що пожежі створюють досить стійку область високого тиску, яку можна порівняти за масштабами з тиском у природних атмосферних утвореннях. Крім того, пожежі призводять до викидів значних мас вуглекислоти та сажі, що прискорює процес глобального потепління.

Тому актуальною задачею є дослідження фізичних процесів та екологічних наслідків впливу пірогенного фактору на лісові екосистеми. Для цього потрібна розробка адекватних математичних моделей горіння великих лісових масивів.

Горінню лісів присвячено велику кількість робіт [2–18]). У цих роботах детально обговорюються причини виникнення пожеж, їхній розвиток, методи дослідження, способи гасіння та екологічні наслідки пожеж. Значне місце приділялося їхньому прогнозуванню.

Математичні моделі лісових пожеж розроблялися низкою авторів [5, 12, 17, 19, 20].

Усі типи моделей умовно можна поділити на такі групи.

1. Аналітичні та чисельно-аналітичні.
2. Експериментально-статистичні (лісопірологічні).

3. Змішані (експериментально-теоретичні).

В основі двох останніх типів лежать спостереження та вимірювання перебігу та наслідків пожеж.

В основі першого типу лежить математичне моделювання. У якості вихідних використовується громізка система рівнянь тепло- і масопереносу для реагуючих речовин, а також рівняння перенесення випромінювання. Такі моделі дозволяють детально описати низку фізичних процесів, що супроводжують виникнення та розвиток лісових пожеж. Разом з тим вони мають наступні недоліки.

1) Складність. В основі лежать нелінійні диференціальні рівняння у частинних похідних. У загальному випадку модель є тривимірною.

2) У моделі входить велика кількість параметрів, що важко визначаються.

3) Найчастіше вихідні рівняння можна розв'язати числовими методами.

4) Зазвичай моделі є локальними за простором та часом.

Таким чином, моделі відрізняються складністю, надмірною деталізацією. В інших випадках вони є не цілком адекватними. Необхідно розробити прості аналітичні моделі параметричного типу. У цій роботі в якості такого параметра розглядається площа пожежі.

Мета роботи – розробка математичних моделей, що описують поширення великомасштабних лісових пожеж, спрямованих на оцінку екологічних наслідків впливу пірогенного фактору.

Параметри лісових масивів і пожеж

Лісові пожежі мають наступні особливості:

- 1) Пожежа – складний багатопараметричний процес.
- 2) Пожежі в загальному випадку поширюються у неоднорідному та анізотропному середовищі.
- 3) Поширення пожежі у часі не є рівномірним.
- 4) Інтенсивність пожежі залежить від її площі, об'єму лісових горючих матеріалів,

температури повітря, вологості ґрунту та повітря, кількості опадів, точки роси та інших параметрів.

Далі перерахуємо основні параметри пожеж.

Основними параметрами пожежі є його площа S і тривалість T . Маса спалюваного матеріалу m залежить від питомої маси деревини

$$\tilde{m} = \frac{m}{S}.$$

Питома маса деревини залежить від типу лісу і змінюється у широких межах: від 10 до 60 кг/м² (табл. 1). Цей параметр становить для кущів 1–3 кг/м², для трави – 0.1–1 кг/м², для лісостепу – 1–10 кг/м², а для лісів – 10–60 кг/м².

Теплова енергія, що виділяється при згорянні маси m матеріалів

$$E = qm = q\tilde{m}S,$$

де q – питома теплотворна здатність. Для лісового масиву в середньому $q \approx 10^7$ Дж/кг.

Швидкість вигорання лісу визначається параметром

$$\mu = \frac{d\tilde{m}}{dt}.$$

Таблиця 1

Залежність питомої маси деревини від виду екогеосистеми

Table 1

Dependence of wood specific mass on the ecogeosystem type

Екогеосистема	Степ	Лісостеп	Середньозіхотний ліс	Субтропічний ліс	Тропічний ліс
m , кг/м ³	0.1–1	1–10	10–20	20–30	30–60

Відомо, що $\mu = (4 \pm 1) \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с) [21]. В середньому, $\mu \approx 4.0 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с). Знаючи \tilde{m} і μ , можна обчислити характерний час вигорання лісу:

$$\tau = \frac{\tilde{m}}{\mu}.$$

За $\tilde{m} = 10–60$ кг/м² маємо $\tau \approx 0.7–4.2$ години. Повний час вигорання щонайменше 2τ , тобто щонайменше 1.4–8.4 години.

Потужність, що виділяється під час горіння

$$P = \frac{dE}{dt} = q\mu S.$$

Густина потоку тепла та потужності

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

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

За $q = 10^7$ Дж/кг, $\tilde{m} = 20$ кг/м² та $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/(м²·с) маємо $\Pi = 2 \cdot 10^8$ Дж/м² і $\Pi_P = 4 \cdot 10^4$ Вт/м². За $\Pi_P \geq 10^4$ Вт/м² виникають вогняні смерчі [21,22].

Важливим параметром пожежі є швидкість переміщення фронту горіння w . З цією швидкістю пов'язана інтенсивність горіння

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

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

Швидкість w та інтенсивність I змінюються в широких межах. За відсутності вітру для низових пожеж (горить трава та чагарник) $w = 0.02–0.10$ м/с, для верхових (горять

крони дерев, що зникаються) $w \approx 0.1–1$ м/с. За наявності сильного вітру ці значення збільшуються на порядок.

За $q = 10^7$ Дж/кг, $\tilde{m} \approx 20$ кг/м² та $w = 1–10$ м/с маємо $I \approx 0.2–2$ ГВт/м. У той самий час для низової пожежі за $q \approx 5 \cdot 10^6$ Дж/кг, $\tilde{m} \approx 0.1$ кг/м² та $w = 0.02$ м/с маємо $I = 10$ кВт/м. Зауважимо, що верхова пожежа виникає за $I > I_{\min} \approx 4$ МВт/м. Для виникнення такої пожежі достатньо, щоб швидкість $w > 0.1$ м/с, а $\tilde{m} > 4$ кг/м².

Семибальна класифікація інтенсивності горіння, запропонована авторами, наведена у табл. 2.

Температура горіння деревини змінюється в широких межах: від 700–900°C до 1200°C. Над палаючим лісом виникає струміль гарячого повітря, що піднімається вгору з надлишком температури ΔT близько 20 К. Швидкість підйому струменя v досягає 75 м/с [21]. Потужність струменя

$$P_j = C_p \rho S_j v \Delta T,$$

де ρ – густина нагрітого повітря, S_j – поперечна площа струменя, C_p – питома теплоємність повітря за постійного тиску. За $\rho \approx 1$ кг/м³, $v = 75$ м/с, $S_j = 1$ км², $C_p = 10^3$ Дж/(кг·К), $\Delta T = 20$ К маємо $P_j \approx 1.5 \cdot 10^{12}$ Вт. Потужність горіння за $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/м² і $S = 100$ км² становить $4 \cdot 10^{12}$ Вт.

Нагрітий струміль здатний піднятися на велику висоту, закидаючи продукти горіння навіть у стратосферу. Максимальна

Таблиця 2

Класифікація інтенсивності пожежі

Table 2

Fire intensity classification

Бал	Приплив горючих матеріалів, кг/(м·с)	Якісна характеристика інтенсивності	Інтенсивність, МВт/м	Рівень небезпеки щодо наслідків впливу пірогенного фактору
1	$<10^{-3}$	Наднизька	$<10^{-2}$	Низова пожежа. Горіння дуже повільне
2	$10^{-3}-10^{-2}$	дуже низька	$10^{-2}-10^{-1}$	Низова пожежа. Горіння повільне
3	$10^{-2}-0.1$	Низька	$10^{-1}-1$	Низова пожежа. Горіння помірне. Можлива верхова пожежа
4	0.1–1	Помірна	1–10	Виникають верхові пожежі. Можливий вогняний смерч. Значна задимленість. Небезпека для навколишніх населених пунктів
5	1–10	Висока	$10-10^2$	Стрімкий розвиток пожеж. Вогняний смерч. Можливе знищення навколишніх населених пунктів
6	$10-10^2$	дуже висока	10^2-10^3	Вогняний смерч. Можливе виривання дерев із корінням. Знищення навколишніх населених пунктів. Локальна екологічна катастрофа
7	$>10^2$	екстремальна	$>10^3$	Вогняний смерч. Виривання дерев із корінням. Екологічна катастрофа у регіоні. Можуть постраждати десятки населених пунктів. Можливі жертви серед населення

висота підйому може бути оцінена за емпіричною формулою [22]:

$$z_{\max} [\text{км}] \approx \frac{1}{4} P^{1/4} [\text{МВт}].$$

За $P = 4 \cdot 10^6$ МВт маємо $z_{\max} \approx 11$ км. У той же час висота полум'я при великих лісових пожежах не перевищує 30–50 м.

До розвитку струменя гаряче повітря піднімається вгору зі швидкістю конвекції [22]

$$v_c = \left(\frac{2\mu g d_s}{\rho} \right)^{1/3} \approx \left(\frac{2\mu g S^{1/2}}{\rho} \right)^{1/3},$$

де $g \approx 9.8 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння, $d_s = S^{1/2}$ – розмір джерела нагріву (пожежі).

Результати розрахунку швидкості v_c наведено в табл. 3. З табл. 3 видно, що за $S > 1 \text{ км}^2$ $v_c > 5 \text{ м/с}$, тобто розвивається описаний вище струмінь.

Таблиця 3

Залежність швидкості конвекції від площі пожежі

Table 3

Dependence of convection rate on a fire area

Площа пожежі, м^2	10^2	10^4	10^6	10^8	10^{10}
Швидкість конвекції, м/с	1	2	4.6	10	20

Аналітичні моделі

Розглянемо кілька простих моделей, які дозволяють описати процес поширення лісової пожежі.

Середовище вважатимемо однорідним та ізотропним. Погодні умови враховуються опосередковано за допомогою параметрів, що входять у модель (питомої маси горючих

матеріалів, характерного часу вигорання, швидкості поширення фронту горіння).

Слід розрізняти повну площу S_t , пройдену вогнем, та площу S , одночасно охоплену вогнем.

Збільшення площі пожежі в часі у загальному вигляді описується наступним співвідношенням:

$$\frac{dS}{dt} = \Sigma_1(t, S) - \Sigma_2(t, S), \quad S_{|t=0} = S_0,$$

де Σ_1 – швидкість збільшення площі пожежі за рахунок руху фронту горіння, Σ_2 – швидкість зменшення цієї площі за рахунок вигорання горючих матеріалів. Для знаходження повної площі досить розв'язати рівняння

$$\frac{dS_t}{dt} = \Sigma_1, \quad S_{|t=0} = S_{10}.$$

Постійна швидкість зростання площі пожежі

Припустимо, що площа пожежі збільшується у часі t із постійною швидкістю σ . Одночасно з цим вона зменшується за рахунок повного вигорання з характерним часом τ . Така модель реалізується за умови одностороннього поширення пожежі. Модель описується рівнянням:

$$\frac{dS}{dt} = \sigma - \frac{S}{\tau}, \quad S_{|t=0} = S_0, \quad (1)$$

де S_0 – початкова площа пожежі, $\sigma > S/\tau$.

За постійного σ , а значить і Σ_1 , отримаємо, що

$$S_t = \sigma T.$$

Далі отримаємо розв'язок рівняння (1).

За певних значень σ і τ настає стаціонарне значення площі

$$S_\infty = \sigma \tau. \quad (2)$$

Тоді з (1) і (2) випливає, що

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{S - S_\infty}{\tau}, \quad S_{|t=0} = S_0. \quad (3)$$

Розв'язок (3) має вигляд:

$$S(t) = S_\infty + (S_0 - S_\infty)e^{-t/\tau}. \quad (4)$$

Оскільки зазвичай $S_0 \ll S_\infty$, зі співвідношення (4) отримуємо

$$S(t) \approx S_\infty(1 - e^{-t/\tau}).$$

Двовимірна модель

Припустимо, що пожежа поширюється у всі сторони, а довжина фронту горіння l_f залежить тільки від площі згідно за законом

$$l_f = k\sqrt{S}. \quad (8)$$

Значення коефіцієнта k залежить від конфігурації площі горіння. Можна показати, що в залежності від геометрії лісу k змінюється приблизно від 3.5 до 4.5. У середньому $k = 4$.

Його розв'язок за $\Sigma_1 \neq \Sigma_1(S)$ має вигляд:

$$S_t(t) = \int_0^t \Sigma_1 dt.$$

Швидкість Σ_2 представляємо у вигляді:

$$\Sigma_2 = \frac{S}{\tau}.$$

Зауважимо, що якщо у початковий момент часу $\Sigma_{10} < \Sigma_{20}$, то пожежа припиняється.

За $t/\tau \gg 1$ маємо $S \approx S_\infty$.

За довжини фронту горіння l_f маємо $\sigma = l_f w$. Тоді

$$S_\infty = l_f w \tau. \quad (5)$$

У цій моделі довжина l_f залишається незмінною. Наприклад, за $l_f = 100$ м, $w = 0.1$ м/с і $\tau = 4 \cdot 10^3$ с маємо $S_\infty = 4$ га. Якщо ж $l_f = 10$ км, $w = 10$ м/с і $\tau = 10^4$ с, то з (5) отримаємо, що $S_\infty = 10^9$ м² = 1000 км². З цих оцінок видно, що значення S_∞ змінюється у широких межах, які залежать переважно від значень l_f і w , тобто σ .

Енергія горіння за $t/\tau \gg 1$

$$E_\infty = q\tilde{m}S_\infty = q\tilde{m}\sigma\tau. \quad (6)$$

Тоді середня потужність горіння за час τ

$$P_\infty = \frac{E_\infty}{\tau} = q\tilde{m}\sigma. \quad (7)$$

Наприклад, за $q = 10^7$ Дж/кг, $\tilde{m} = 20$ кг/м², $\sigma = 10^5$ м²/с та $\tau = 10^4$ с маємо $E_\infty = 200$ ПДж, а $P_\infty = 20$ ТВт. Така потужність дещо перевищує потужність, що споживає все людство (близько 15 ТВт). Енергія E_∞ у 4000 разів перевищує енергію, що виділилася під час вибуху боеприпасу над м. Хіросіма у 1945 р. (одна «хіросіма» дорівнює $5 \cdot 10^{13}$ Дж \approx 12 кт ТНТ [21]).

Рівняння для площі горіння з урахуванням (8) має вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = k\sqrt{S}w - \frac{S}{\tau}, \quad S_{|t=0} = S_0. \quad (9)$$

Враховано також, що, як і раніше, $\sigma = l_f w$.

Крім того, вважається, що $kw > \sqrt{S}/\tau$.

Спочатку наведемо співвідношення для S_t , тобто коли в (9) не враховується член S/τ . Воно має вигляд:

$$S_t(t) = \left(\sqrt{S_0} + \frac{k}{2} wt \right)^2.$$

За $t = T$ у цьому рівнянні перший член набагато менший за другий, тобто

$$S_t(T) = \left(\frac{k}{2} wT \right)^2.$$

Важливо, що $S_t(T) \sim w^2, T^2$.

Розв'язок рівняння (9) має вигляд:

$$S(t) = S_\infty \left[1 - \left(1 - \sqrt{S_0 / S_\infty} \right) e^{-t/2\tau} \right]^2. \quad (10)$$

Тут

$$S_\infty = (kw\tau)^2. \quad (11)$$

Значення S_∞ – розв'язок (9) за $t/2\tau \gg 1$.

Оскільки часто $S_0/S_\infty \ll 1$, з (10) випливає, що

$$S(t) \approx S_\infty \left(1 - e^{-t/2\tau} \right)^2.$$

Звідси за $t/2\tau \ll 1$, маємо

$$S(t) \approx S_\infty (t/2\tau)^2$$

Враховуючи співвідношення (11), отримаємо, що

$$E_\infty = q\tilde{m}(kw\tau)^2,$$

$$P_\infty = q\tilde{m}(kw)^2 \tau.$$

Оцінки за цими формулами для $q = 10^7$ Дж/кг, $\tilde{m} = 20$ кг/м², $k \approx 4$, $w = 10$ м/с, $\tau = 10^4$ с дають $E_\infty \approx 32$ ЕДж = $3.2 \cdot 10^{19}$ Дж, а $P_\infty = 3.2$ ПВт = $3.2 \cdot 10^{15}$ Вт.

Секторний рух фронту горіння

Нехай під дією вітру має місце горіння у секторі з постійним розкритом α . За радіусу сектора r його площа:

$$S = \frac{1}{2} l_f r = \frac{1}{2} r^2 \alpha = \frac{l_f^2}{2\alpha}. \quad (12)$$

де $l_f = r\alpha$.

Припустимо, що з часом радіус зростає за лінійним законом, тобто $r = wt$. Тоді з урахуванням (12) площа, пройдена вогнем,

$$S_1 = S_0 + \frac{\alpha}{2} w^2 t^2.$$

Вигоріла площа дається аналогічним співвідношенням:

$$S_2 = S_0 + \frac{\alpha}{2} w^2 (t - \tau)^2,$$

де τ – час вигорання. Тоді площа, зайнята вогнем,

$$S_f(t) = S_1 - S_2 = \alpha w^2 \tau \left(t - \frac{\tau}{2} \right). \quad (13)$$

За $t \gg \tau/2$ маємо

$$S_f(t) \approx \alpha w^2 \tau t. \quad (14)$$

З (13) і (14) випливає, що площа збільшується

з часом за лінійним законом доти, доки весь ліс не вигорить. Нехай це відбувається за $t = T$, де $T = L/w$, L – розмір лісу у напрямі горіння. Тоді

$$S_{f \max} = \alpha w \tau L. \quad (15)$$

Оскільки

$$L = r_{\max} = \sqrt{\frac{2S_{\max}}{\alpha}},$$

з (15) випливає, що

$$S_{f \max} = 2\alpha (w\tau)^2. \quad (16)$$

Наприклад, за $\alpha = 1$, $w = 10$ м/с, $\tau = 10^4$ с та $L = 100$ км маємо $S_{f \max} = 10^{10}$ м² = 10000 км².

З урахуванням (15) отримаємо, що

$$E_{\max} = q\tilde{m}\alpha w \tau L, \quad (17)$$

$$P_{\max} = q\tilde{m}\alpha w L. \quad (18)$$

Використовуючи (16), з (17) та (18) маємо

$$E_{\max} = 2\alpha q\tilde{m} (w\tau)^2,$$

$$P_{\max} = 2\alpha q\tilde{m} w^2 \tau.$$

За тих же параметрів отримаємо, що $E_{\max} = 2$ ЕДж, $P_{\max} = 0.2$ ПВт.

Довжина фронту горіння лінійно зростає у часі

Припустимо, що характерний розмір пожежі, а разом із ним $l_f \sim t$. Тоді $\sigma = l_f w = \beta t$, де $\beta = \text{const}$. Тоді вихідне рівняння має вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = \beta t - \frac{S}{\tau}, \quad S|_{t=0} = S_0. \quad (19)$$

Для S_t справедливий співвідношення:

$$S_t(t) \approx S_0 + \frac{\beta}{2} t^2,$$

$$S_t(T) \approx S_0 + \frac{\beta}{2} T^2.$$

Очевидно, що за $S_0 \ll \beta T^2/2$ площа

$$S_t(T) \approx \frac{\beta}{2} T^2.$$

Розв'язок (19) дається таким співвідношенням:

$$S(t) = \beta\tau(t - \tau) + (S_0 + \beta\tau^2)e^{-t/\tau}. \quad (20)$$

Якщо ж $t \gg \tau$, то з (20) отримаємо, що

$$S(t) \approx S_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right) + \frac{1}{2}\beta t^2 \approx S_0 + \frac{1}{2}\beta t^2.$$

За $t \gg \tau$ співвідношення (20) спрощується:

$$S(t) \approx \beta t \tau. \quad (21)$$

Значення $t_{\max} = L/w$. Тоді з (21) випливає, що

$$S_{\max} = \frac{\beta\tau L}{w}.$$

Оцінимо далі β . Оскільки

$$l_f = k_1 w t,$$

де k_1 – коефіцієнт порядку одиниці, то

$$\sigma = l_f w = k_1 w^2 t = \beta t. \quad (22)$$

З (22) випливає, що

$$\beta = k_1 w^2.$$

Тоді

$$S_{\max} = k_1 w \tau L. \quad (23)$$

При цьому

$$E_{\max} = q\tilde{m} S_{\max} = q\tilde{m} k_1 w \tau L, \quad (24)$$

$$P_{\max} = q\tilde{m} k_1 w L. \quad (25)$$

Якщо врахувати, що $L = k_2 \sqrt{S_{\max}}$, де $k_2 \sim 1$, то

$$S_{\max} = (k_1 k_2 w \tau)^2, \quad (26)$$

$$E_{\max} = q\tilde{m} (k_1 k_2 w \tau)^2, \quad (27)$$

$$P_{\max} = q\tilde{m} (k_1 k_2 w)^2 \tau. \quad (28)$$

За $k_1 k_2 \approx 1$, $w \approx 10$ м/с, $\tau = 10^4$ с маємо $S_{\max} = 10^{10}$ м², $E_{\max} = 2$ ЕДж, $P_{\max} = 0.2$ ПВт.

Зауважимо, що співвідношення (15), (17) і (18) близькі відповідно до співвідношень (23)–(25), а також співвідношень (26)–(28).

Швидкість зміни площі пожежі квадратично зростає у часі

Припустимо, що швидкість зміни площі пожежі з якихось причин збільшується пропорційно до квадрату часу. Такі процеси, що самоприскорюються, спостерігаються на практиці. Вихідне рівняння має вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = \gamma t^2 - \frac{S}{\tau}, \quad S_{t=0} = S_0, \quad (29)$$

де γ – розмірний сталий коефіцієнт. Для S_t маємо

$$S_t(t) \approx S_0 + \frac{\gamma}{3} t^3, \quad S_t(T) = S_0 + \frac{\gamma}{3} T^3.$$

За $S_0 \ll \gamma T^3/3$ отримаємо, що:

$$S_t(T) \approx \frac{\gamma}{3} T^3.$$

Розв'язок (29) дається наступним співвідношенням:

$$S(t) = \gamma\tau^3 \left[\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - 2\left(\frac{t}{\tau} - 1\right) - 2\left(1 - \frac{S_0}{2\gamma\tau^3}\right) e^{-t/\tau} \right] \quad (30)$$

За $t \gg \tau$ рівняння (30) суттєво спрощується:

$$S(t) \approx \gamma\tau t^2. \quad (31)$$

Із (31) випливає, що за $t = t_{\max}$ площа пожежі

$$S_{\max} \approx \gamma\tau t_{\max}^2 \approx \gamma\tau \frac{L^2}{w^2}. \quad (32)$$

Оскільки $k_3 L^2 = S_{\max}$, де $k_3 \sim 1$,

$$\gamma \approx \frac{k_3 w^2}{\tau}. \quad (33)$$

Наприклад, за $k_3 = 1$, $w = 10$ м/с і $\tau = 10^4$ с маємо $\gamma \approx 10^{-2}$ м²/с³. З урахуванням (33) співвідношення (31) набуде наступного вигляду:

$$S(t) = k_3 w^2 t^2. \quad (34)$$

Зазвичай $S_0 \ll 2\gamma\tau^3$. Тоді з (30) отримаємо:

$$S(t) \approx \gamma\tau^3 \left[\left(\frac{t}{\tau}\right)^2 - 2\frac{t}{\tau} + 2(1 - e^{-t/\tau}) \right]. \quad (35)$$

За $t/\tau \ll 1$ з (35) маємо

$$S(t) \approx \frac{\gamma\tau^3}{3},$$

тобто на початку (але за $\gamma\tau^2 \gg S(\tau)$) площа $S(t) \sim t^3$, а за $t/\tau \gg 1$, як видно з (31) і (34), площа $S(t) \sim t^2$. Це означає, що з часом

швидкість зростання площі пожежі сповільнюється. Якщо ж $\gamma t^2 \ll S_0/\tau$, то з (29) випливає, що

$$S(t) \approx S_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right),$$

Узагальнена модель

У загальному випадку рівняння, що описує збільшення площі пожежі, має вигляд:

$$\frac{dS}{dt} = \varphi(t) - \frac{S}{\tau}, \quad S_{t=0} = S_0. \quad (36)$$

Вираз для $S_t(T)$ має вигляд:

$$S_t(T) = S_0 + \int_0^T \varphi(t) dt.$$

За досить великих значень T справедливе таке співвідношення:

$$S_t(T) \approx \int_0^T \varphi(t) dt.$$

Розв'язок (36) дається наступним співвідношенням:

$$S(t) = (S_0 + S_1(t))e^{-t/\tau}, \quad (37)$$

$$S_1(t) = \int_0^t \varphi(t')e^{t'/\tau} dt'.$$

Вираз (37) зручно переписати так:

$$S(t) = S_0 e^{-t/\tau} + \int_0^t \varphi(t')e^{(t'-t)/\tau} dt'.$$

За $t/\tau \ll 1$, $(t' - t)/\tau \ll 1$ маємо

$$S(t) \approx S_0 + \int_0^t \varphi(t') dt'.$$

тобто $S(t) < S_0$. Це означає, що швидкість зміни площі вигорання переважає над швидкістю збільшення площі горіння. Цей процес закінчується в момент часу $t_0 \approx (S_0/\gamma\tau)^{1/2}$.

Якщо ж $t/\tau \gg 1$, то

$$S(t) \approx \int_0^t \varphi(t')e^{(t'-t)/\tau} dt'. \quad (38)$$

Покладемо, що функція $\varphi(t')$ слабко змінюється на інтервалі часу від 0 до t_m . Тоді з (38) випливає, що

$$S(t) \approx \varphi(t)(1 - e^{-t/\tau})\tau.$$

За $t_m/\tau \gg 1$ маємо

$$S(t) \approx S_m \approx \varphi(t_m)\tau.$$

Якщо ж характерний час зміни функції $\varphi(t)$ дорівнює τ_φ і $\tau_\varphi \ll \tau$, то з (38) отримаємо, що

$$S(t) \approx \int_0^{\tau_\varphi} \varphi(t') dt' \approx \varphi(\tau_\varphi)\tau_\varphi.$$

Наведемо ще два аналітичних розв'язки (36). За $\varphi(t) \ll S_0/\tau$ маємо

$$S(t) \approx S_0 \left(1 - \frac{t}{\tau}\right),$$

тобто $S(t) < S_0$. Якщо ж $\varphi(t) \gg S_0/\tau$, то

$$S(t) \approx S_0 + \int_0^t \varphi(t) dt.$$

У цьому випадку $S(t) > S_0$.

Обговорення

У одновимірній моделі горіння лісу максимальна площа, охоплена вогнем, пропорційна довжині фронту горіння, швидкості його руху та характерному часу вигорання. Цим же величинам пропорційна енергія E_{\max} . Потужність P_{\max} пропорційна l_f і w .

Для інших моделей (див. співвідношення (8), (12) і (19)) максимальна площа, охоплена вогнем, пропорційна квадрату швидкості w та часу τ . Це ж стосується й енергії E_{\max} . У той же час P_{\max} пропорційна $w^2\tau$.

У передостанній моделі (29) площа, охоплена вогнем, пропорційна $(wt)^2$.

Максимальний час горіння t_m залежить від розміру лісу L та швидкості w .

Узагальнена модель, яка дається співвідношенням (36), придатна для будь-якої залежності $\varphi(t)$, що визначає швидкість збільшення площі, охопленої вогнем. Не конкретизуючи виду функції $\varphi(t)$, отримано низку асимптотичних розв'язків.

Отримані співвідношення для S_{\max} , E_{\max} та P_{\max} дозволили оцінити ці величини. Для великомасштабних пожеж площа S_{\max} може досягати $\sim 10\text{--}100$ тис. км², енергія $E_{\max} \sim 1\text{--}10$ ЕДж, потужність $P_{\max} \sim 0.1\text{--}1$ ПВт.

Висновки

Визначено і оцінено основні параметри (площа та тривалість пожежі, маса та питома маса горючих матеріалів, швидкість та час вигорання, енергія та потужність горіння, густини потоків тепла та потужності, тощо), що описують великомасштабні лісові пожежі та екологічні наслідки від впливу пірогенного фактору на лісові екосистеми.

Запропоновано семибальну шкалу, що характеризує інтенсивність лісових пожеж та рівень небезпеки щодо наслідків впливу пірогенного фактору на лісові екосистеми.

Розроблено прості аналітичні моделі, які дозволяють оцінити площі, пройдені й охоплені вогнем, а також енергетику горіння лісових масивів.

Показано, що максимальна площа, охоплена вогнем, найчастіше (крім моделі з підрозділу 3.1) пропорційна квадрату швидкості руху фронту горіння, квадрату часу горіння (характерному часу вигорання τ). Цим же величинам пропорційна й енергія, яка виділяється при горінні.

Показано, що максимальна площа, охоплена пожежею, може досягати 10–100 тис. км², енергія горіння – 1–10 ЕДж, а потужність – 0.1–1 ПВт.

Запропоновано семибальну (від наднизької до екстремальної) класифікацію інтенсивності пожежі.

Створено математичні моделі для оцінки екологічних наслідків щодо впливу пірогенного фактору на лісові екосистеми.

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. Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R., Rogers B.M., Morton D.C. Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, No G4. id:G04012. <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>
2. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы и исследования. Херсон: Гринь Д.С., 2011. 458 с.
3. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. Пер. с англ. К.Г. Бомштейна; Под ред. Ю.А. Кошмарова, В.Е. Макарова. М.: Стройиздат, 1990. 424 с.
4. Буц Ю.В. Систематизація процесів пірогенної релаксації екогеосистем в умовах техногенного навантаження. *Екологічна безпека*. 2018. №1(25). С. 7–12. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.7-12>
5. Vacchiano G., Foderi C., Berretti R., Marchi E., Motta R. Modeling anthropogenic and natural fireignitions in an inner-alpine valley. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2018. Vol. 18, No 3. P. 935–948. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-935-2018>
6. Крайнюк О.В., Буц Ю.В., Некос А.Н. Природна пожежа в Рівненському заповіднику та її аналіз. *VinSmartEco: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Вінниця, 16-18 травня 2019 р.)*. Вінниця, 2019. С. 25–26.
7. Buts Y., Asotskyi V., Kraynyuk O., Ponomarenko R. Dynamics of migration capacity of some trace metals in soils in the Kharkiv region under the pyrogenic factor. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*. 2019. No 28(3). P. 409–416. <https://doi.org/10.15421/111938>
8. Буц Ю.В. Науково-методологічні основи релаксії екогеосистем при техногенному навантаженні пірогенного походження. Автореф. ... докт. техн. наук: 21.06.01. Суми, 2020. 46 с. <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76266>
9. 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, Iss. 11. P. 2031–2045. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0712-2>
10. Hebert-Dufresne L., Pellegrini A.F.A., Bhat U., Redner S. Edge fires drive the shape and stability of tropical forests. *Ecology letters*. 2018. Iss. 6. P. 794–803. <https://doi.org/10.1111/ele.12942>
11. 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, Iss. 3. P. 1033–1047. <https://doi.org/10.5902/1980509833952>

12. 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, Iss. 3. P. 386–403. <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1>
13. 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., Battlori 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. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*. 2020. Vol. 108, Iss. 5. P. 2047–2069. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
14. 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>
15. 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>
16. Turner M.G., Braziunas 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, Iss. 1. id: e01485. <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>
17. Holuša J., Koreň M., Berčák R., Resnerová K., Trombik J., Vaněk J., Szczygiel 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, Iss. 6. P. 428–439. <https://doi.org/10.1071/WF20103>
18. 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>
19. 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>
20. Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Черногор 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>
21. Marshall V. C. Major Chemical Hazards. Chichester, U.K.: Ellis Horwood, 1987. 1033 p.

Стаття надійшла до редакції 01.11.2022

Стаття рекомендована до друку 25.11.2022

L. F. CHERNOGOR¹, DSc (Physics and Mathematics), Prof.,
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), Prof.,

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),

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/0000-0002-5313-88501>

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

MATHEMATICAL MODELS FOR ESTIMATE OF THE ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF THE IMPACT OF THE PYROGENIC FACTOR ON FOREST ECOSYSTEMS

There is a need for the development of simple analytical mathematical models of the burning of large forest areas, necessary for the assessment of the ecological consequences of the impact of the pyrogenic factor.

Purpose. Develop mathematical models describing the spread of large-scale forest fires aimed at estimate the ecological consequences of the impact of the pyrogenic factor.

Methods. Analytical review of research on the problem, theoretical and computational, mathematical modeling.

Results. The results of the main parameters analysis of large forest areas combustion are presented. These include the area covered by the fire, the duration of the fire, the burnout time, the specific mass of combustible materials, the energy and power of combustion, the specific calorific value, the intensity of combustion, the movement speed of the combustion front, the influx of combustible materials, etc. Simple analytical mathematical models of large forest areas combustion have been established. These include the following models: a model with a constant growth rate of the fire area, a two-dimensional model, a model with sectorial movement of the combustion front, a model with a linear growth of the length of the combustion front, a model with a quadratic growth of the change rate of the fire area, and a generalized model. A new fire intensity classification has been proposed, containing 1–7 points from extremely low to extreme intensity. The maximum area covered by the fire (10–100 thousand km²), combustion energy (1–10 EJ) and combustion power (0.1–1 PW) have been estimated.

Conclusions. Simple analytical mathematical models of the combustion process of large forest surface areas, which are necessary for quantitative assessment of the ecological consequences of fires, have been developed.

KEYWORDS: mathematical model, forest fire, combustion parameters, fire intensity classification

References

1. Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R., Rogers B.M., & Morton D.C. (2012). Global burned area and biomass burning emissions from small fires. *J. Geophys. Res.*, 117(G4). id:G04012. <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>
2. Khodakov V.E., & Zharikova M.V. (2011). *Forest fires: research methods*. Kherson: Grin D. S. (in Russian).
3. Drysdale D. (2011). *An Introduction to Fire Dynamics*, (3rd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119975465>
4. Buts Y.V. (2018). Systematization of processes of pyrogenic relaxation ecogeosystem in the conditions of technogenic load. *Ecological safety*, 1(25), 7–12. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.7-12>
5. Vacchiano G., Foderi C., Berretti R., Marchi E., & Motta R. (2018). Modeling anthropogenic and natural fire-ignitions in an inner-alpine valley. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), 935–948. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-935-2018>
6. Krainiuk O.V., Buts Y.V., & Nekos A.N. (2019). Natural fire in the Rivne wildlife sanctuary and its analysis. *Proceedings Int. Sci. & Pract. Conf. VinSmartEco* (pp. 25–26). Vinnytsia,
7. Buts Y., Asotskyi V., Kraynyuk O., & Ponomarenko R. (2019). Dynamics of migration capacity of some trace metals in soils in the Kharkiv region under the pyrogenic factor. *Journ. Geol. Geograph. Geoecology*, (28(3), 409–416. <https://doi.org/10.15421/111938>

8. Buts, Yu. V. (2021). 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)
9. 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>
10. 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>
11. 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>
12. 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>
13. McLaughlan K.K., Higuera P.E., Miesel J., Rogers B.M., Schweitzer J., Shuman J.K., Topley 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>
14. 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, id: 118272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118272>
15. 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>
16. 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), id: e01485. <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>
17. Holuša J., Koreň M., Berčák R., Resnerová K., Trombik J., Vaněk J., Szczygiel 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>
18. 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, id: 119037. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119037>
19. Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2021). Ecological consequences from forest burning in the Northern hemi-sphere in 2020: Results of modeling and quantitative calculations. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Ecology»*, (25), 42-54. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04> (in Ukrainian)
20. 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)
21. Marshall V. C. (1987). *Major Chemical Hazards*. Chichester, U.K.: Ellis Horwood.

The article was received by the editors 01.11.2022

The article is recommended for printing 25.11.2022