

## ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-05>

УДК (UDC): 630

**Л. Ф. ЧОРНОГОР<sup>1</sup>**, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

завідувач кафедри космічної радіофізики

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

**А. Н. НЕКОС<sup>1</sup>**, д-р географ. наук, проф.,

завідувачка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти

e-mail: [alnekos999@gmail.com](mailto:alnekos999@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

**Г. В. ТІТЕНКО<sup>1</sup>**, канд. географ. наук, доц.,

директор навчально-наукового інституту екології

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

**Л. Л. ЧОРНОГОР<sup>1</sup>**,

студент навчально-наукового інституту екології

e-mail: [L.L.Chornohor@gmail.com](mailto:L.L.Chornohor@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи 4, 61022, м. Харків, Україна

### КЛАСИФІКАЦІЯ ПОЖЕЖ У ПРИРОДНИХ ЕКОСИСТЕМАХ ЗА ФІЗИЧНИМИ ТА ЕКОЛОГІЧНИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Для якісної та кількісної характеристики інтенсивності лісових пожеж та їхніх екологічних наслідків необхідна розробка спеціальної шкали для класифікації на зразок шкали сили вітру, морських штормів, землетрусів, інтенсивності геомагнітних бур тощо.

**Мета.** Опис розроблених шкал для класифікації лісових пожеж за різними параметрами, що характеризують фізико-хімічні процеси, екологічні наслідки та рівень небезпеки від пірогенних факторів.

**Методи.** Системний аналіз, багатofакторний аналіз, математичне моделювання.

**Результати.** Запропоновано семибальні шкали для класифікації лісових пожеж за інтенсивністю, енергетичними характеристиками, масою викидів основних продуктів горіння та супутніх хімічних елементів, а також за екологічними наслідками для стану довкілля та рівнем небезпеки. Обґрунтовано, що при помірному та слабкому вітру інтенсивність і енергетика лісових пожеж в Україні зазвичай не перевищує 4–5 балів, тобто помірного або високого рівня. Пожежі цього рівня були, наприклад навесні-влітку-восени 2020 р. у низці регіонів України.

**Висновки.** Розроблені спеціальні шкали для класифікації лісових пожеж за різними параметрами є ефективним інструментом для якісної та кількісної характеристики інтенсивності лісових пожеж та їхніх екологічних наслідків. Отримані результати можуть також використовуватися для оцінки екологічних наслідків, матеріальних збитків й соціальних втрат.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** лісова пожежа, семибальна шкала, класифікація, інтенсивність, енергетичні параметри, викиди, продукти горіння, екологічні наслідки

**Як цитувати:** Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Черногор Л. Л. Класифікація пожеж у природних екосистемах за фізичними та екологічними характеристиками. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2023. Вип. 29. С. 48 - 56. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-05>

**In cites:** Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2023). Fire classification in natural ecosystems by physical and environmental characteristics. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series «Ecology»*, (29), 48 – 56. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2023-29-05> (in Ukrainian)

© Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Черногор Л. Л., 2023



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

## Вступ

Спостереження показують, що у другій половині 20-го століття та на початку 21-го століття число та інтенсивність природних і техногенних катастроф невідомо зростає. Зважаючи на те, що сонячна активність залишається практично незмінною, можна дійти до висновку, що причиною інтенсифікації катастроф є антропогенний фактор. Це потужний техногенний вплив, що обумовлює прискорене погіршення екологічного стану довкілля, та, зокрема, явище глобального потепління. При цьому невідомо зростає не тільки температура атмосфери, а й температура Світового океану. Це призводить до зростання сили та частоти ураганів, тайфунів, катастрофічних опадів, стимуляції сейсмічних явищ, вибухів вулканів тощо.

Одним із проявів глобального потепління є зростання частоти й інтенсивності великомасштабних лісових пожеж [1–6]. Важливо, що при цьому має місце позитивний зворотній зв'язок. Пожежі призводять до викиду значних мас сажі, яка, поширюється завдяки атмосферному переносу у глобальних масштабах за 1-2 тижні, осідає, зокрема, в Арктиці та Антарктиці. При цьому зменшується коефіцієнт відбиття (альbedo) льодовиків, збільшується поглинання сонячної енергії, що стимулює підвищення температури атмосфери. Це призводить до збільшення ймовірності виникнення великомасштабних лісових пожеж, що й забезпечує виникнення позитивного зворотного зв'язку.

Дослідженню процесів, що супроводжують великомасштабні лісові пожежі, присвячена велика кількість робіт. Короткий огляд цих робіт зроблено авторами [2]. Тут лише підкреслимо, що значна увага приділялася причинам виникнення пожеж, процесу поширення вогняної стихії, методам дослідження наслідків пожеж, способам їхнього гасіння та прогнозуванню пожеж [7–22].

Значно менше уваги приділялося екологічним наслідкам великомасштабних

пожеж у природних екосистемах. Авторами [9–12] детально проаналізовано та розроблено науково-методичні основи релаксації екологічних систем, що зазнали впливу лісових пожеж. Автори [2] дослідили екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні, що мали місце навесні-влітку-восени 2020 р. Встановлено, що екологічні наслідки регіонального масштабу були дуже значними. У роботах [3,6] теоретично обчислено та змодельоване екологічні наслідки катастрофічних лісових пожеж у Північній півкулі в 2020 р. Доведено, що ці наслідки мали глобальне значення та були рекордними за величиною викидів продуктів горіння. Автори [4] проаналізували параметри лісових пожеж і супутніх фізичних процесів, запропонували головні енергетичні, геометричні та теплофізичні параметри великомасштабних лісових пожеж. Розроблено прості аналітичні фізико-математичні моделі головних параметрів і фізичних процесів, що супроводжують великомасштабні лісові пожежі. У роботі [5] розвинуто аналітичні, математичні моделі протікання процесу горіння великих лісових масивів, необхідні для кількісної оцінки екологічних наслідків пожеж.

Як відомо, для характеристики та класифікації високоенергійних природних процесів розроблено спеціальні шкали. Так, наприклад, є шкала вітру, шторму на морі, сили землетрусу, вибухової здатності вулкана, геомагнітної бурі, геокосмічної бурі тощо. Зазвичай кількість балів у існуючих шкалах коливається від 5 до 10.

Для науковців на сьогодні актуальним завданням є розробка відповідних шкал, які будуть характеризувати параметри масштабних пожеж у природних екосистемах.

Мета роботи – опис розроблених шкал для класифікації лісових пожеж за різними параметрами, що характеризують фізико-хімічні процеси, екологічні наслідки та рівень небезпеки від пірогенних факторів.

## Методи дослідження

Для класифікації лісових пожеж за різними параметрами використано методи наукових досліджень такі як системний аналіз,

багатофакторний аналіз, математичне моделювання низки головних фізичних процесів і їхніх екологічних наслідків.

### Класифікація за інтенсивністю пожежі в екосистемі

Головним параметром пожежі у природній екосистемі є її інтенсивність, яка визначається припливом горючих матеріалів. Вона вимірюється в одиницях маси, відносно до одиниці довжини фронту горіння за одиницю часу. В системі СІ це є  $1 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ . Приплив горючих матеріалів є добутком питомої маси цих матеріалів ( $\text{кг}/\text{м}^2$ ) на швидкість переміщення фронту горіння ( $\text{м}/\text{с}$ ).

Похідною величиною є інтенсивність горіння. Вона є добутком припливу горючих матеріалів ( $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$ ) на питому теплотворну здатність (зазвичай біля  $10 \text{ МДж}/\text{кг}$ ). Інтенсивність горіння вимірюється в таких одиницях:  $\text{Вт}/\text{м}$  (або  $\text{кВт}/\text{м}$ ,  $\text{МВт}/\text{м}$ ). Для якісної та кількісної характеристики інтенсивності масштабної пожежі у природній екосистемі пропонується класифікація за семибальною шкалою, що наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація масштабних пожеж у природній екосистемі за інтенсивністю

Table 1

#### Classification of fires by intensity

Бал	Якісна характеристика інтенсивності	Приплив горючих матеріалів, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$	Інтенсивність, $\text{МВт}/\text{м}$	Рівень небезпеки, екологічні та соціальні наслідки
1	Наднизька	$<10^{-3}$	$<10^{-2}$	Низова пожежа. Горіння дуже повільне
2	Дуже низька	$10^{-3}-10^{-2}$	$10^{-2}-10^{-1}$	Низова пожежа. Горіння повільне
3	Низька	$10^{-2}-0.1$	$10^{-1}-1$	Низова пожежа. Горіння помірне. Можлива верхова пожежа
4	Помірна	$0.1-1$	$1-10$	Виникають верхові пожежі. Можливий вогняний смерч. Значна задимленість. Небезпека для навколишніх населених пунктів
5	Висока	$1-10$	$10-10^2$	Стрімкий розвиток пожежі. Вогняний смерч. Можливе знищення навколишніх населених пунктів
6	Дуже висока	$10-10^2$	$10^2-10^3$	Вогняний смерч. Можливе виривання дерев із корінням. Знищення навколишніх населених пунктів. Локальна екологічна катастрофа. Ймовірні жертви серед населення
7	Екстремальна	$>10^2$	$>10^3$	Вогняний смерч. Виривання дерев із корінням. Регіональна екологічна катастрофа. Можуть постраждати десятки населених пунктів. Дуже ймовірні жертви серед населення

Наведені дані (табл. 1) демонструють, що інтенсивність пожеж змінюється від наднизької (бал – 1) до екстремальної (бал – 7). При цьому приплив горючих матеріалів та інтенсивність змінюються більше, ніж на п'ять порядків.

Основні параметри пожеж, що характерні для регіонів України, наведені в табл. 2. Показники у табл. 1 і табл. 2 показують, що за відсутності вітру пожежі у степовій, лісостеповій та лісовій природних зонах в межах України характеризуються балами 2, 3–4 та 4–5 відповідно. При дуже сильному

вітру ( $\approx 20 \text{ м}/\text{с}$ ) бали підвищуються до 4, 5 та 6 відповідно. Інтенсивність пожеж, перш за все, залежить від питомої маси горючих матеріалів і швидкості переміщення фронту горіння. У меншій мірі інтенсивність визначається питомою теплотворною здатністю горючих матеріалів. Питома маса збільшується в залежності від якісних та структурних характеристик екогеосистеми у 200 разів, швидкість переміщення фронту горіння – у 1000 разів, а питома теплотворна здатність – лише у 10 разів.

Таблиця 2

Основні параметри пожеж, характерних для природних зон на території України

Table 2

The main parameters of fires characteristic of natural zones on the territory of Ukraine

Екогео-система	Питома маса горючих матеріалів, кг/м <sup>2</sup>	Швидкість переміщення фронту горіння, м/с	Приплив горючих матеріалів, кг/(м·с)	Питома теплотворна здатність, МДж/кг	Інтенсивність горіння, МВт/м
Степ	0,1–1	0,02–0,1 (1–20)	0,002–0,1 (0,02–1)	1–3	0,002–0,3 (0,02–3)
Лісостеп	1–10	0,1–1 (1–20)	0,1–10 (0,1–50)	3–10	0,3–100 (0,3–500)
Ліс	10–20	0,1–1 (1–20)	1–20 (1–100)	10	10–200 (100–1000)

### Класифікація пожеж в екосистемах за екологічними наслідками

У цій класифікації вихідним параметром є площа пожежі у цілому на земній кулі або в окремій державі чи окремому регіоні. Наприклад, сумарна площа пожеж влітку 2020 р. у Північній півкулі сягала 15 млн га. Площа пожеж визначає екологічні наслідки, а саме масу згорілих матеріалів, енергію та потужність горіння, енергію та потужність акустичного випромінювання, масу викидів диму, вуглеводнів, вуглекислого газу, чадного газу, сажі, інших хімічних елементів. Методика математичного моделювання та обчислення цих параметрів наведена у роботах авторів [2-5]. Результати моделювання показано у табл. 3. У запропонованій шкалі балам 1-7 відповідає та ж

сама якісна характеристика інтенсивності пожеж, що й наведена у табл. 1.

Вважається, що середня питома маса горючих матеріалів – 20 кг/м<sup>2</sup>, питома теплотворна здатність – 10 МДж/кг, швидкість вигоряння  $4 \cdot 10^{-3}$  кг/(м<sup>2</sup>·с) [3,4].

Дані параметрів табл. 3. показують, що за семибальною шкалою енергетичні характеристики та маси викидів основних речовин змінюються на п'ять та більше порядків. Для території України показник енергетичних характеристик і мас викидів не перевищує 5 балів, тобто енергетика та екологічні наслідки для навколишнього середовища можуть бути високими.

Таблиця 3

Класифікація лісових пожеж за площею, енергетичними характеристиками та масою викидів основних продуктів горіння

Table 3

Classification of forest fires by area, energy characteristics and mass of emissions of the main combustion products

Бал	Загальна площа пожежі, км <sup>2</sup>	Маса згорілих матеріалів, Мт	Енергія горіння, ПДж	Середня потужність горіння, ТВт	Енергія акустичного випромінювання, ТДж	Середня потужність акустичного випромінювання, ТВт	Маса диму, вуглеводів, кг	Маса CO <sub>2</sub> , Мт	Маса CO, кг	Маса C, кг
1	<0,1	<0,002	<0,02	<0,004	<0,6	<0,12	<0,08	<0,0045	<0,2	<0,006
2	0,1–1	0,002–0,2	0,02–0,2	0,004–0,04	0,06–0,6	0,012–0,12	0,08–0,8	0,0045–0,045	0,2–2	0,006–0,06
3	1–10	0,02–0,2	0,2–2	0,04–0,4	0,6–6	0,12–1,2	0,8–8	0,045–0,45	2–20	0,06–0,6
4	10–100	0,2–2	2–20	0,4–4	6–60	1,2–12	8–80	0,45–4,5	20–200	0,6–6
5	100–1000	20–200	20–200	4–40	60–600	12–120	80–800	4,5–45	200–2000	6–60
6	1000–10000	200–2000	200–2000	40–400	600–6000	120–1200	800–8000	45–450	2000–20000	60–600
7	>10000	>200	>2000	>400	>6000	>1200	>8000	>450	>2000	>600

У табл. 4 вказана питома маса хімічних елементів, що утворюються під час горіння лісових масивів.

Наведені у табл. 5 данні показують, що найбільша маса викидів пов'язана з великою концентрацією атомарного азоту, маси

викидів інших елементів менше у  $10^5 - 10^7$  разів. Для території України з оцінкою лісових пожеж у 5 балів (за 7-ми бальною шкалою) викиди N складають 10–100 кг, а інших елементів – від одиниць кілограм до одиниць тон.

Таблиця 4

Питома маси викидів хімічних елементів під час горіння лісових масивів

Table 4

Specific mass of emissions of chemical elements during forest burning

Хімічні елементи	N	K	Ca	Fe	Zn	Cr	Br	Mn	Pb	Rb	Sr	Se
Питома маса викидів, кг/м <sup>2</sup>	0,5	$7 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$	$3 \cdot 10^{-8}$

Таблиця 5

Класифікація лісових пожеж за масою емітованих хімічних елементів

Table 5

Classification of forest fires by the mass of emitted chemical elements

Бал	Загальна площа пожежі, км <sup>2</sup>	Маса викидів хімічного елементу, кг										
		N	K	Ca	Fe	Zn	Cr	Br	Mn	Pb	Rb	Sr, Se
1	<0,1	$<10^4$	$<7 \cdot 10^{-7}$	$<6 \cdot 10^{-7}$	$<2 \cdot 10^{-7}$	<0,05	<0,04	<0,015	<0,015	<0,006	<0,004	<0,003
2	0,1–1	$10^4-10^5$	(0,7–7)	(0,6–6)	(0,2–2)	0,05–0,5	0,04–0,4	0,015–0,15	0,015–0,15	0,006–0,06	0,004–0,04	0,003–0,03
3	1–10	$10^5-10^6$	(0,7–7)	(0,6–6)	(0,2–2)	0,5–5	0,4–4	0,15–1,5	0,15–1,5	0,06–0,6	0,04–0,4	0,03–0,3
4	10–100	$10^6-10^7$	$0,7-7 \cdot 10^2$	$(0,6-6) \cdot 10^2$	$(0,2-2) \cdot 10^2$	5–50	4–40	1,5–15	1,5–15	0,6–6	0,4–4	0,3–3
5	100–1000	$10^7-10^8$	$(0,7-7) \cdot 10^3$	$(0,6-6) \cdot 10^3$	$(0,2-2) \cdot 10^3$	50–500	40–400	15–150	1,5–15	6–60	4–40	3–30
6	1000–10000	$10^8-10^9$	$(0,7-7) \cdot 10^4$	$(0,6-6) \cdot 10^4$	$(0,2-2) \cdot 10^4$	500–5000	400–4000	150–1500	1,5–15	60–600	40–400	30–300
7	>10000	$10^9$	$>7 \cdot 10^4$	$>6 \cdot 10^4$	$>2 \cdot 10^4$	>5000	>4000	>1500	>1500	>600	>400	>300

## Обговорення

Класифікація за інтенсивністю пожежі. Запропонована семибальна шкала для класифікації масштабних пожеж у природних екосистемах за інтенсивністю. Вихідним параметром є приплив горючих матеріалів при пожежі, який змінюється від значення  $10^{-3}$  до  $10^2$  кг/(м·с). Похідним параметром є інтенсивність горіння, яка варіює від  $10^{-2}$  до  $10^3$  МВт/м. Саме ці параметри визначають рівень небезпеки, екологічні, економічні та соціальні наслідки. Це шкала є зручною для оцінки наслідків в регіональних масштабах.

Окремо обчислено основні параметри екосистем і пожеж, які характерні для різних регіонів України. Природно, що найменші екологічні наслідки пожеж мають місце у степовій екосистемі. Тут пожежі характеризуються балом 2 за слабого (1–3 м/с) вітру та балом, що сягає 4 за сильного вітру (близько 20 м/с). Найбільш небезпечними є пожежі у лісовій екосистемі. У цій системі пожежі характеризуються балом 4-5 при слабкому вітру та балом 6 за сильного вітру.

Класифікація за екологічними наслідками. Запропонована семибальна шкала для класифікації масштабних пожеж у природ-

них екосистемах за площею, енергетичними характеристиками та масою викидів основних продуктів горіння. На відміну від попередньої шкали, яка призначена для оцінки регіональних наслідків, ця шкала характеризує екологічні, економічні та соціальні наслідки у масштабах окремого регіону, окремої країни та планети у цілому.

### Висновки

Проведено математичне моделювання та числові розрахунки основних параметрів для різних природних зон, енергетичних характеристик і мас викидів основних продуктів горіння та супутніх хімічних елементів під час масштабних пожеж у природних екосистемах у широкому діапазоні параметрів.

Запропоновано семибальні шкали для класифікації масштабних пожеж у природних екосистемах за інтенсивністю, енергетичними характеристиками, масою викидів основних продуктів горіння та супутніх хімічних елементів, а також за екологічними наслідками для стану довкілля та рівнем безпеки.

Розроблена шкала базується на результатах математичного моделювання та числових розрахунків, запропонованих авторами [2–5].

Отримані результати представляють собою вагомий внесок у новий науковий напрям, що можна сформулювати як фізика та екологія великомасштабних пожеж у природних екосистемах.

Встановлено, що у цілому інтенсивність та енергетика масштабних пожеж може сягати 7 балів, тобто екстремального рівня. Такими, наприклад, були лісові пожежі влітку 2020 р. у Північній півкулі.

Обґрунтовано, що при помірному та слабкому вітру інтенсивність і енергетика масштабних пожеж у природних екосистемах в Україні зазвичай не перевищує 4–5 балів, тобто помірного або високого рівня. Пожежі цього рівня були, наприклад навесні-влітку-восени 2020 р. в низці регіонів України.

### 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. Drysdale D. (2011). An Introduction to Fire Dynamics, (Zrd d.). Neck DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>
2. 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. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07>
3. Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко А. 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/10.26565/1992-4259-2021-25-04>
4. 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. № 26. С. 43-54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04>
5. 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. № 27. С. 51-62. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-27-04>
6. Chernogor, L., Nekos, A., Titenko, G., Chernogor, L. Sustainable development of natural and economic systems: theory, methodology, and practice: collective monograph. / under the general edition of Lidia Horoshkova, Iegen Khlobystov. Ecological consequences of the large forests fires in the northern hemisphere during 2020. Poland: Bilostok. С. 259–276. ISBN 978-83-953142-4-7

7. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы и исследования. Херсон: Гринь Д.С., 2011. 458 с.
8. 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. DOI: <https://doi.org/10.5194/nhess-18-935-2018>
9. Буц Ю.В. Систематизація процесів пірогенної релаксації екогеосистем в умовах техногенного навантаження. *Екологічна безпека*. 2018. №1(25). С. 7–12. DOI: <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.7-12>
10. 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.
11. 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. DOI: <https://doi.org/10.15421/111938>
12. 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>
13. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0712-2>
14. 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. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12942>
15. 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. *Ciência Florestal*. 2019. Vol. 29, Iss. 3. P. 1033–1047. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
16. 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. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1>
17. 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. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*. 2020. Vol. 108. №. 5. P. 2047–2069. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
18. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118272>
19. 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. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0314>
20. 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. № 1. id: e01485. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>
21. 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. №. 6. P. 428–439. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF20103>
22. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119037>

Стаття надійшла до редакції 24.10.2023

Стаття рекомендована до друку 14.11.2023

**L. F. CHERNOGOR**<sup>1</sup>, DSc (Physics and Mathematics), Prof.,

Head of the Space Radio Physics Department

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

**A. N. NEKOS**<sup>1</sup>, DSc (Geography), Prof.,

Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education

e-mail: [alnekos999@gmail.com](mailto:alnekos999@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

**G. V. TITENKO**<sup>1</sup>, PhD (Geography),

Head of Karazin Institute of Environmental Sciences

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

**L. L. CHORNOHOR**<sup>1</sup>,

Student of Karazin Institute of Environmental Sciences

e-mail: [L.L.Chornohor@gmail.com](mailto:L.L.Chornohor@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University,

4, Svobody Sq., 61022, Kharkiv, Ukraine

## FIRE CLASSIFICATION IN NATURAL ECOSYSTEMS BY PHYSICAL AND ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS

To qualitatively and quantitatively characterize and classify the intensity of forest fires and their environmental consequences, it is necessary to develop a special scale similar to the scale of wind strength, sea storms, earthquakes, geomagnetic storms, etc.

**Purpose.** To describe the scales developed for the classification of forest fires according to various parameters characterizing physicochemical processes, environmental consequences and the level of danger from pyrogenic factors.

**Methods.** System analysis, multifactorial analysis, mathematical modeling.

**Results.** A seven-magnitude scale for classifying forest fires by intensity, energy characteristics, mass of emissions of the main combustion products and related chemical elements, as well as by environmental consequences and hazard level is proposed. It is substantiated that with moderate and weak winds, the intensity and energy of forest fires in Ukraine usually do not exceed 4-5 magnitudes, i.e., a moderate or high level. Fires of this level occurred, for example, in the spring, summer, and fall of 2020 in a number of regions of Ukraine.

**Conclusions.** The developed special scales for classifying forest fires according to various parameters are an effective tool for qualitative and quantitative characterization of the intensity of forest fires and their environmental consequences. The obtained results can also be used to assess environmental impacts, material damage and social losses.

**KEYWORDS:** *wildfire, seven-point scale, classification, intensity, energy parameters, emissions, combustion products, environmental consequences*

## References

1. Drysdale, D. (2011). An Introduction to Fire Dynamics, (Zrd d.). Neck. <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>
2. Chernogor, 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. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology», (24), 79-90. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07> (In Ukrainian)
3. Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2021). Ecological Consequences from Forest Burning in the Northern Hemisphere in 2020: Results of Modeling and Quantitative Calculations. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University Series «Ecology», (25), 42-54. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-04> (In Ukrainian)
4. 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)
5. 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)



6. Chernogor, L., Nekos, A., Titenko, G., Chernogor, L. (2020). Sustainable development of natural and economic systems: theory, methodology, and practice: collective monograph. In Horoshkova, L. & Khlobystov, Ie. (Eds.) *Ecological consequences of the large forest fires in the northern hemisphere during 2020*. Poland: Bilostok. 259-276. ISBN 978-83-953142-4-7
7. Khodakov V.E., Zharikova M.V. (2011). Forest fires: methods and research. Kherson: Hryn D.S. (In Ukrainian)
8. 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>
9. Buts, Y.V. (2018). Systematization of processes of pyrogenic relaxation of ecosystems under conditions of anthropogenic load. *Ecological safety*, (1(25), 7-12. <https://doi.org/10.30929/2073-5057.2018.1.7-12> (In Ukrainian)
10. Krainiuk, O.V., Buts, Y.V., & Nekos, A.N. (2019). Natural fire in the Rivne Reserve and its analysis. VinSmar-tEco: materials of the international scientific and practical conference (Vinnytsia, May 16-18, 2019). Vinnytsia, 25-26. (In Ukrainian)
11. Buts, Y., Asotskiy, V., Krainyuk, 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>
12. Buts, Y.V. (2020). Scientific and methodological bases of relaxation of ecosystems under anthropogenic load of pyrogenic origin. Master's thesis. Sumy. Retrieved from <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76266> (In Ukrainian)
13. 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>
14. 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>
15. 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>
16. 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>
17. 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. (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>
18. 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>
19. 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>
20. Turner, M.G., Brazianus, 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>
21. 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>
22. 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>

The article was received by the editors 24.10.2023

The article is recommended for printing 14.11.2023