

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-06>

УДК (UDC): 504.055

Л. Ф. ЧОРНОГОР¹, д-р фіз.-мат. наук, проф., член-кор. НАН України,
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

ПАРАМЕТРИ ТА ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ КАТАСТРОФІЧНИХ ПОЖЕЖ В УКРАЇНІ: МОДЕЛЮВАННЯ, КІЛЬКІСНІ ОЦІНКИ

Кліматичні умови та активізація бойових дій на сході України у 2024 р. (серпень і вересень) призвели до горіння великих за площею масивів лісів і трав'янистих покривів, що потребує оцінки наслідків.

Методи. Системний аналіз, багатофакторний аналіз, математичне моделювання.

Мета. Обчислення основних параметрів пожеж в екосистемах України, що мали місце влітку-восени 2024 р., та оцінка їхніх екологічних наслідків.

Результати. Обчислено головні енергетичні параметри лісових і трав'янистих пожеж, викликаних літньою спекою і військовими діями в Україні в 2024 р. Наприкінці серпня – на початку вересня горів фактично весь схід України. Всього в Україні полум'ям було охоплено близько 43 тис. га. Згоріло близько 500 кт деревини та 350 кт трави. Викиди диму, сажі, оксидів азоту в рази перевищували фонові значення мас цих речовин. Інжекція поліароматичних вуглеводнів перевищувала фонові значення у 570, мікрочастинок PM_{2.5} – у 14 разів, потужність акустичного випромінювання – у 30 разів. Викиди CO, SO_x не перевищували декількох десятків відсотків. Поширенню пожеж у екосистемах, крім військових дій, сприяла висока температура повітря, відсутність дощів та вітер.

Висновки. Розрахунки та математичне моделювання показали, що наслідки горіння лісових масивів і трав'янистих покривів в Україні в 2024 р. були катастрофічними. Обґрунтовано, що більшість пожеж викликані військовими діями на території України. Екологічна ситуація суттєво ускладнилася під дією пилової бурі, що надійшла з Казахстану та Середньої Азії. Короточасні та тривалі екологічні наслідки дуже значні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лісова пожежа, горіння трави, екосистема, енергетичний параметр, інжекція, продукт горіння, хімічний елемент, екологічні наслідки

Як цитувати: Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л. Параметри та екологічні наслідки катастрофічних пожеж в Україні: моделювання, кількісні оцінки. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2024. Вип. 42. С. 83-94. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-06>

In cites: Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2024). Parameters and environmental consequences of catastrophic fires in Ukraine: modeling, quantitative estimates. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (42), 83-94. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-42-06> (In Ukrainian)

Вступ

Пожежам в екосистемах традиційно приділяється велика увага [1–22]. Кожного року серпень-вересень в Україні є найбільш

шим пожежонебезпечний для екосистем. У 2024 р. ці місяці стали особливо небезпечними. Для цього було декілька причин. По-

© Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л., 2024



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

перше, літо 2024 р. стало найбільш спекотним за всю історію спостережень. Тут свою роль зіграли як глобальне потепління, так і вплив явища Ель-Ніньйо. Температура повітря в денний час в Україні сягала 35°C, а швидкість вітру 35 км/год. По-друге, дощів у серпні-вересні практично не було. Рівень опадів не перевищував третини від норми. Формувалися значні за площею сухостої з трави, чагарників тощо. По-третє, активізація бойових дій на сході України призвела до безперервного горіння великих за площею масивів лісів і трав'янистих покривів. За даними супутникових спостережень (ресурс FIRMS), горів фактично весь схід України (рис. 1).

На кінець серпня – початок вересня тільки площа лісових пожеж у Донецькій і Харківській областях сягала 1520 га. Трава на площі 100–500 м² горіла одночасно в 90 займаннях. Наприклад, через обстріл Руської Лозової загорілася трава на площі 2 га. В-четвертих, гасіння пожеж дуже ускладнено або було неможливим в результаті бойових дій і їхніх наслідків (мінувань, підривів тощо). За даними ДСНС за 8 місяців 2024 р. зафіксовано 38 тис. пожеж у екосистемах. Це вдвічі більше, ніж за той же час у 2023 р. Безпрецедентними були значення індексу пожежної небезпеки, який сягав 50000.

Приклад горіння лісів у влітку – восени в 2924 р. в Україні показані на рис. 2.

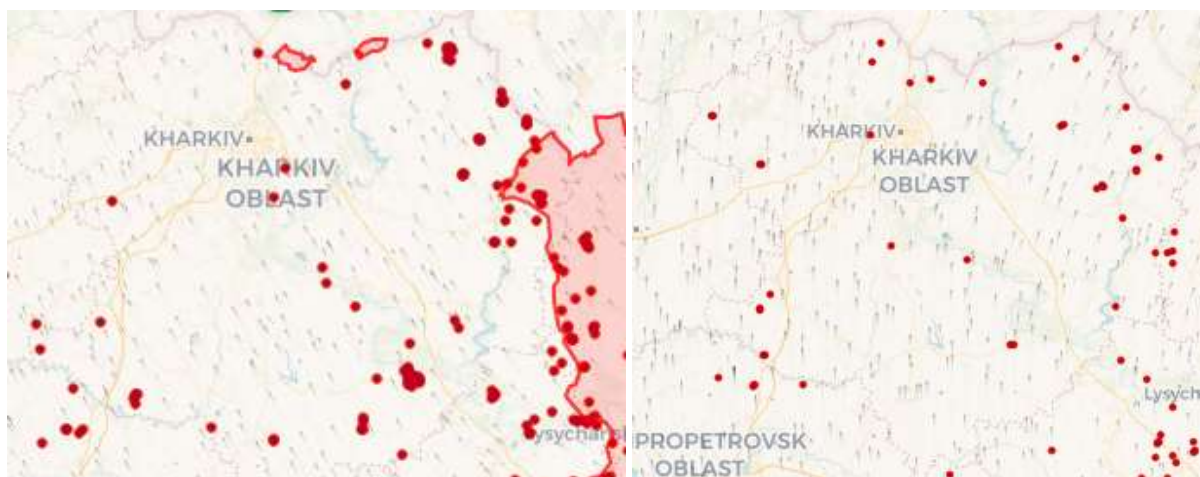


Рис. 1. – Лісові пожежі в Харківській області 9 вересня (ліворуч) та 15 вересня 2024 р (праворуч). Червоним кольором показано осередки пожеж [<http://surl.li/ecuxra>]

Fig. 1. – Forest fires in Kharkiv region on September 9(left) and September 15, 2024 (right). Fires are shown in red [<http://surl.li/ecuxra>]



Рис. 2. – Горіння лісів в Україні в серпні – вересні 2024 р. [<http://surl.li/gatchz>]

Fig. 2. – Forest fires in Ukraine in August – September 2024 [<http://surl.li/gatchz>]

Мета роботи – обчислення основних параметрів пожеж в екосистемах України,

що мали місце влітку-восени 2024 р., та оцінка їхніх екологічних наслідків.

Матеріали та засоби

Для кількісних оцінок екологічних наслідків інтенсивних пожеж в екосистемах України використовувалася методологія, розроблена авторами [4 – 6]. Окремі цифрові дані про пожежі та їхні світлини запозичувалися з системи Internet.

Як і в попередніх наших роботах, головним параметрами екосистем, що постраждали від пожеж, будемо вважати площу S ,

пройдену вогнем, масу згорілих матеріалів m , питому масу горючих матеріалів μ , питому енергію горіння q , час вигорання τ , швидкість переміщення фронту горіння (за відсутності вітру) v [4 – 6]. При горінні лісових масивів у середньому $\mu = 10 \text{ кг/м}^2$, $q = 20 \text{ МДж}$, $\tau = 2.5 \cdot 10^3 \text{ с}$, $v = 3 \text{ м/с}$. Під час горіння трави $\mu = 1 \text{ кг/м}^2$, $q = 20 \text{ МДж/кг}$, $\tau = 200 \text{ с}$, $v = 5 \text{ см/с}$ [4–6].

Результати обчислень енергетичних параметрів горіння

Горіння лісу. Горіння великих лісових масивів на сході України спостерігалось на межі серпня-вересня 2024 р. Пожежа виникла на Донеччині. Горів Національний природний парк "Святі гори". Потім пожежа перекинулася на Харківську область. Вогонь пройшов площу біля 5 тис. га. Пожежа продовжувалася близько 5 діб (впродовж $\Delta t \approx 5 \cdot 10^5 \text{ с}$). За даними ДСНС тільки за перший тиждень вересня на Харківщині виявлено 498 загорянь, у 23 випадках горіли ліси, в інших – трава. За цей час в Україні вирувало більше 30 тис. пожеж в екосистемах.

Горіння великих масивів лісових масивів супроводжується виділенням тепла (енергії горіння E потужністю P), генерацією теплового випромінювання з густиною потоку Π_T , потужністю P_T та енергією E_T , а також акустичного випромінювання з густиною потоку Π_a , потужністю P_a та енергією E_a .

Для енергії та потужності горіння маємо наступні співвідношення [4 – 6]:

$$E = mq = \mu Sq, \quad P = q dm/dt = Sq d\mu/dt \quad (1)$$

де dm/dt та $d\mu/dt$ – часові похідні від маси та питомої маси продуктів горіння.

Для густини потоку теплового випромінювання за температури горіння $T = 1000 \text{ К}$ маємо

$\Pi_T \approx \sigma T^4 \approx 56.76 \text{ кВт/м}^2$, де $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$ – стала Стефана–Больцмана. Тут враховано, що $T^4 \gg T_0^4$, де $T_0 \approx 300 \text{ К}$. Тоді

$$P_T = \Pi_T S, \quad E_T = P_T \Delta t. \quad (2)$$

Для акустичного випромінювання

$$P_a = \eta_a P, \quad E_a = \eta_a E, \quad (3)$$

де $\eta_a \approx 3 \cdot 10^{-3}$ – коефіцієнт перетворення теплової енергії в акустичну енергію.

Результати підрахунків основних енергетичних параметрів горіння лісових екосистем за співвідношенням (1)–(3) наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Основні енергетичні параметри лісових пожеж (характерний час вигорання – 2500 с)

Table 1

Main energy parameters of forest fires (typical burnout time is 2500 s)

Площа пожежі, га	100	200	300	500	1000	1500	2000	5000
Маса згорілих матеріалів, кг	10	20	30	50	100	150	200	500
Енергія горіння, ПДж	0,2	0,4	0,6	1	2	3	4	10
Потужність горіння, ГВт	80	160	240	400	800	1200	1600	4000
Енергія теплового випромінювання, ПДж	28,5	57	85,5	142,5	285	428	570	1425
Потужність теплового випромінювання, ГВт	57	114	171	285	570	855	1140	2850
Енергія акустичного випромінювання, ТДж	0,6	1,2	1,8	3	6	9	12	30
Потужність акустичного випромінювання, ГВт	0,24	0,48	0,72	1,2	2,4	3,6	4.8	12

З табл. 1 можна визначити, що зі збільшенням площі лісового масиву від 100 до 5000 га маса згорілої деревини збільшується від 10 до 500 кт. При цьому енергія та середня потужність горіння зростають відповідно від 0,1 до 5 ПДж і від 40 до 2000 ГВт. Енергія та потужність теплового випромінювання збільшується відповідно від 6,8 до 204 ПДж і від 13,6 до 680 ГВт. Значними є величини акустичної енергії та потужності, які сягали відповідно значень від 60 до 3000 ТДж і від 120 до 6000 МВт.

Далі порівняємо, між собою густини потоку енергії горіння $\Pi = \mu q = 80 \text{ кВт/м}^2$, теплового випромінювання $56,7 \text{ кВт/м}^2$ і акустичного випромінювання $0,24 \text{ кВт/м}^2$. До-

дамо, що густина потоку сонячного випромінювання на поверхні землі на широтах України складає близько $0,6 \text{ кВт/м}^2$. Це означає, лісові пожежі суттєво впливають на екосистеми.

Горіння трави. За 8 місяців 2024 р. в Україні згоріло більше 35 тис. га трави. Звичайно, питома енергія горіння приблизно у 5 разів менше для трави, ніж для деревини. Крім того, питома маса трави на порядок менше питомої маси деревини. Але через великі площі трави, пройдені вогнем, вплив горіння трави на екосистеми є суттєвим.

Результати розрахунків основних енергетичних параметрів горіння трави в Україні в 2024 р. за співвідношенням, подібним до (1)–(3), наведено у табл. 2.

Таблиця 2

**Основні енергетичні параметри трав'яних пожеж
(характерний час вигорання – 200 с)**

Table 2

**Main energy parameters of grass fires
(typical burnout time is 200 s)**

Площа пожежі, га	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5	10
Маса згорілих матеріалів, т	1	2	3	5	10	20	30	50	100
Енергія горіння, ТДж	0,02	0,04	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	1	2
Потужність горіння, ГВт	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5	10
Енергія теплового випромінювання, ГДж	4,6	9,2	13,8	23	46	92	138	230	460
Потужність теплового випромінювання, МВт	23	46	69	115	230	460	690	1150	2300
Енергія акустичного випромінювання, ГДж	0,06	0,12	0,18	0,3	0,6	1,2	1,8	3	6
Потужність акустичного випромінювання, МВт	0,3	0,6	0,9	1,5	3	6	9	15	30

Із табл. 2. видно, що за сумарної площі одночасних трав'яних пожеж ~ 10 га дія горіння трави на екосистеми була значною. При цьому, за сто діб ($\sim 10^7$ с) в атмосферу ло інжектовано 2 ТДж тепла за середньої потужності 10 ГВт, теплового випромінювання з енергією 460 ГДж потужністю близько 2,3

ГВт та акустичного випромінювання з енергією 6 ГДж за потужності 30 МВт.

Всього за 8 місяців 2024 р. трав'яні пожежі пройшли площу 35 тис. га. При цьому згоріло 350 кт рослинності, виділилося 6,4 ПДж тепла та 19,2 ТДж акустичної енергії.

Результати обчислень інжектованих в атмосферу продуктів горіння

Горіння лісу. Результати обчислень інжектованих в атмосферу основних продуктів горіння наведено у табл. 3. До основних продуктів горіння віднесено дим, вуглекислий газ, чадний газ, сажу, вуглеводні, оксиди сульфату, оксиди азоту, а також мікрочастинки розміром менше 2,5 мікрона (PM 2,5) і поліароматичні вуглеводні (ПАВ).

Із табл. 3 можна бачити, що при зростанні площі лісової пожежі від ~ 100 до 5000

га маса диму зростає від 0,4 до 20 кт, маса CO_2 – від 22,6 до 1130 кт, маса CO – від 1 до 50 кт, маса C – від 30 т до 1,5 кт, маса вуглеводнів – від 0,4 до 20 кт, маса оксидів сульфату – від 10 до 500 т, маса оксидів азоту – від 30 до 1500 т, маса мікрочастинок – від 0,1 до 5 кт і маса ПАВ – від 0,2 до 10 т.

Таким чином, викиди продуктів горіння лісових масивів були дуже значними.

Таблиця 3

Маса інжекттованих в атмосферу продуктів горіння лісових масивів

Table 3

Mass of forest combustion products injected into the atmosphere

Площа пожежі, га	100	200	300	500	1000	1500	2000	5000
Маса диму, кг	0,4	0,8	1,2	2	4	6	8	20
Маса CO ₂ , кг	22,6	45,2	67,8	113	226	339	452	1130
Маса CO, кг	1	2	3	5	10	15	20	50
Маса С, кг	30	60	90	150	300	450	600	1500
Маса вуглеводнів, кг	0,4	0,8	1,2	2	4	6	8	20
Маса SO _x , т	10	20	30	50	100	150	200	500
Маса NO _x , т	30	60	90	150	300	450	600	1500
Маса мікрочастинок PM 2,5, кг	0,1	0,2	0,3	0,5	1	1,5	2	5
Маса ПАВ, т	0,2	0,4	0,6	1	2	3	4	10

Горіння трави. Результати оцінки мас інжекттованих в атмосферу продуктів горіння трав'яних масивів наведено у табл. 4.

Із цієї таблиці видно, що в результаті одночасного горіння трави на площі від 0,3 до 10 га викиди диму сягають від 0,04 до 4 т,

CO₂ – від 2,26 до 226 т, CO – від 0,1 до 10 т, С – від 3 до 300 кг, вуглеводнів – від 0,04 до 4 т, SO₄ – від 1 до 100 кг, NO_x – від 3 до 300 кг, мікрочастинок – від 10 до 1000 кг і ПАВ – від 0,02 до 2 кг.

Таблиця 4

Маса інжекттованих в атмосферу продуктів горіння трав'янистих покривів

Table 4

Mass of grassland combustion products injected into the atmosphere

Площа пожежі, га	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5	10
Маса диму, т	0,04	0,08	0,12	0,2	0,4	0,8	0,12	2	4
Маса CO ₂ , т	2,26	4,52	6,78	11,3	22,6	45,2	67,8	113	226
Маса CO, т	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5	10
Маса С, кг	3	6	9	15	30	60	90	150	300
Маса вуглеводнів, т	0,04	0,08	0,12	0,2	0,4	0,8	0,12	2	4
Маса SO _x , кг	1	2	3	5	10	20	30	50	100
Маса NO _x , кг	3	6	9	15	30	60	90	150	300
Маса мікрочастинок PM 2,5, кг	10	20	30	50	100	200	300	500	1000
Маса ПАВ, кг	0,02	0,04	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	1	2

За сумарної площі $S = 35000$ га і маси згорілої трави 350 кг мали місце наступні маси викидів: диму – 14 кг, вуглекислого газу – 791 кг, чадного газу – 35 кг, сажі – 1,05 кг, вуглеводнів – 14 кг, оксидів сульфату –

0,35 кг, оксидів азоту – 1,05 кг, мікрочастинок – 3,5 кг та ПАВ – 7 т.

Ці дані свідчать, що викиди продуктів горіння трав'янистих покривів за минулі 8 місяців 2024 р. були значними.

Результати обчислень інжекттованих в атмосферу хімічних елементів

Під час пожеж у природних екосистемах мають місце викиди, перш за все, наступних хімічних елементів: N, K, Ca, Fe, Zn, Cr, і Br. Дещо менші викиди таких елементів: Mn, Pb, Sr, Se та ін.

Горіння лісу. Результати обчислень (табл. 5). визначають, що найбільшу масу

мають викиди азоту. При збільшенні площі лісу, пройденої вогнем, від 100 до 5000 га маса N зростає від 0,5 до 25 кг. В той же час маса K – лише від 7 до 350 кг, маса Ca – від 6 до 300 кг, маса Fe – від 2 до 50 кг, маса Zn – від 0,5 до 25 кг, маса Cr – від 0,4 до 20 кг і маса Br та Mn – від 0,15 до 7,5 кг.

Таблиця 5

Маса інжектіваних хімічних елементів при лісових пожежах

Table 5

Mass of injected chemical elements in forest fires

Площа пожежі, га	100	200	300	500	1000	1500	2000	5000
Маса N, кг	0,5	1	1,5	2,5	5	7,5	10	25
Маса K, кг	7	14	21	35	70	105	140	150
Маса Ca, кг	6	12	18	30	60	90	120	300
Маса Fe, кг	2	4	6	10	20	30	40	50
Маса Zn, кг	0,5	1	1,5	2,5	5	7,5	10	25
Маса Cr, кг	0,4	0,8	1,2	2	4	6	8	20
Маса Br, кг	0,15	0,30	0,45	0,75	1,5	2,25	3	75
Маса Mn, кг	0,15	0,30	0,45	0,75	1,5	2,25	3	75
Маса Pb, кг	0,06	0,12	0,18	0,30	0,60	0,90	1,2	3
Маса Rb, кг	0,04	0,08	0,12	0,20	0,40	0,60	0,80	2
Маса Sr, кг	0,03	0,06	0,09	0,15	0,30	0,45	0,60	1,5
Маса Se, кг	0,03	0,06	0,09	0,15	0,30	0,45	0,60	1,5

Горіння трави. Обчислені значення мас хімічних елементів наведено у табл. 6. Із табл. 6 визначено, що при збільшенні площі одночасного горіння трави від 0,1 до 10 га маса викидів N зростає від 50 до 5000 кг. Викиди всіх інших елементів є значно меншими. Маса K змінюється лише від 0,7 до 70 мг, маса Ca – від 0,6 до 60 мг, маса Fe – від 0,2 до 20 мг, маса Zn – від 0,05 до 5 мг, маса

Cr – 0,04 до 4 мг, а маса Br та Mn – від 0,005 до 1,5 мг. Маса викидів інших елементів є ще меншою.

За площі в 35000 га сумарні викиди були досить значними, а саме N – 17,5 кг, K – 245 кг, Ca – 210 кг, Fe – 70 кг, Zn – 1,75 кг, Cr – 1,4 кг, Br та Mn – 0,5 кг. Маса інжектіваних в атмосферу інших хімічних елементів помітно менше.

Таблиця 6

Маса інжектіваних хімічних елементів при трав'яних пожежах

Table 6

Mass of injected chemical elements during grass fires

Площа пожежі, га	0,1	0,2	0,3	0,5	1	2	3	5	10
10Маса N, кг	50	100	150	250	500	1000	1500	2000	5000
Маса K, мг	0,7	1,4	2,1	3,5	7	14	21	35	70
Маса Ca, мг	0,6	1,2	1,8	3	6	12	18	30	60
Маса Fe, мг	0,2	0,4	0,6	1	2	4	6	10	20
Маса Zn, мг	0,05	0,10	0,15	0,25	0,5	1	1,5	2,5	5
Маса Cr, мг	0,04	0,08	0,12	0,20	0,40	0,80	1,2	2	4
Маса Br, мг	0,015	0,030	0,045	0,075	0,15	0,30	0,45	0,75	1,5
Маса Mn, мг	0,015	0,030	0,045	0,075	0,15	0,30	0,45	0,75	1,5
Маса Pb, мг	0,006	0,012	0,018	0,030	0,06	0,12	0,18	0,30	0,60
Маса Rb, мг	0,004	0,008	0,012	0,020	0,04	0,08	0,12	0,20	0,40
Маса Sr, мг	0,003	0,006	0,009	0,015	0,03	0,06	0,09	0,15	0,30
Маса Se, мг	0,003	0,006	0,009	0,015	0,03	0,06	0,09	0,15	0,30

Обговорення. Екологічні наслідки

Енергетика процесів. Екологічні наслідки. Під час горіння лісів і трав виділялося приблизно 16 ПДж тепла. Для порівняння – все населення України споживає за добу близько 16 ПДж усіх видів енергії. Густина потоку теплового випромінювання під час горіння лісових масивів і трав'янистих покриттів було відповідно ~57 та ~23 кВт/м². Такого

значення достатньо для поширення фронту горіння навіть за відсутності вітру. Наявність вітру значно пришвидшувала рух фронту горіння.

Сумарна енергія акустичного випромінювання внаслідок пожеж наближалася до 40 ТДж за фонового значення цієї енергії на території України 35 ТДж. Це означає, що

енергія акустичного випромінювання перевищила фонові значення приблизно на 140%. Потужність акустичного випромінювання у 30 разів перевищувала фонове значення. Важливо, що більша частина енергії акустичного випромінювання прийшла на інфразвуковий діапазон. Коливання цього діапазону вухами людини не сприймаються, але негативно впливають на її самопочуття людини, її нервову систему, викликаючи необґрунтоване відчуття тривоги, паніки, страху тощо.

Викиди продуктів горіння. Екологічні наслідки. Результати порівняння головних параметрів горіння лісових масивів і трав'янистих покривів, що призводять до значних екологічних наслідків, з фоновим значенням цих параметрів наведено у табл. 7.

Із табл. 7 видно, що викиди диму перевищили фонові значення майже вшестеро, викиди сажі – більш ніж вчетверо, викиди

оксидів азоту – майже в 1,5 рази, випромінювання акустичної енергії – майже в 1,4 рази.

Відносно збільшення викидів чадного газу, вуглеводів, оксидів, сульфату складало десятки відсотків. Найбільшим було зростання маси мікрочастинок РМ 2,5 (приблизно у 14 разів) і особливо маси ПАВ (у 570 разів). Дуже незначними були викиди вуглекислого газу (близько 0,03%).

З екологічної та медичної точок зору найбільш небезпечними були викиди диму та сажі, що містили мікрочастинки РМ 2,5, та викиди ПАВ. Важливо, що мікрочастинки, що утворилися під час пожеж, піднімаються з потоками нагрітого повітря вгору на сотні метрів, переміщується вітром на відстані від сотень до тисяч кілометрів і існують в атмосфері впродовж декількох місяців. Зменшення концентрації мікрочастинок відбувається за рахунок опадів, яких так не вистачало в серпні – вересні 2024 р.

Таблиця 7

Параметри екологічних наслідків горіння лісових масивів і трав'янистих покривів в Україні в 2024 р.

Table 7

Parameters of environmental consequences of forest and grassland burning in Ukraine in 2024

Параметр	Фонове значення над Україною	Викиди при горінні лісу	Викиди при горінні трави	Відносне збільшення, %
Маса диму, кг	6	20	14	567
Маса CO ₂ , Мт	2760	0,113	0,79	0,03
Маса CO, кг	600	50	35	14,2
Маса С, кг	0,6	1,5	1,05	425
Маса вуглеводів, кг	6000	20	14	0,57
Маса SO _x , кг	3	0,5	0,35	28,3
Маса NO _x , кг	2,4	2,5	1,05	148,3
Маса мікрочастинок РМ 2,5, кг	0,6	5	3,5	1417
Маса ПАВ, т	0,03	10	7	5,7·10 ⁴
Акустична енергія, ТДж	35	30	19,2	140,6
Акустична потужність, ГВт	0,4	12	0,03	3·10 ³

Як відомо, мікрочастинки диму та сажі з розміром менше 2,5 мікрона здатні приводити до низки захворювань дихальної системи та серця. За даними ВООЗ щороку через підвищеної концентрації таких частинок у світі додатково помирає більше 0,1 млн людей.

Як уже вказувалося, на межі серпня-вересня 2024 р., горів фактично весь схід України. При цьому маса мікрочастинок склала не менше 2 кг. За площі 4·10⁴ км² та товщини атмосферного шару з мікрочастинками 100 м

без врахування дії вітру маємо середню концентрацію цих частинок 50 мг/м³. Це в 5 тис. разів перевищує гранично допустиму концентрацію (0,01 мг/м³). За рахунок вітру площа запилення збільшилася до 2·10⁶ км², а концентрація частинок зменшилася до 1 мг/м³.

Обговоримо екологічні наслідки інжекції ПАВ. До ПАВ належать сполуки, що містять два або більше конденсованих бензольних кільця в молекулі з молекулярною масою 128-276. Інжекція канцерогенних ПАВ, бензола, формальдегіда, фенола та важких

металів призводить до онкологічних захворювань, мутагенної та теригенної дії на біологічні об'єкти та людину, зокрема. За даними ВООЗ, інжекція ПАВ призводить до збільшення на ~10% онкологічних захворювань і пухлини мозку в людини. Нагадаємо, що викиди ПАВ під час пожеж в Україні у 570 разів перевищили фонові значення.

Шкідлива дія сполук SO_x і NO_x загально відома. Під час пожеж їхня концентрація суттєво збільшувалася. Тим паче це відноситься до викидів С та CO .

Екологічні наслідки горіння лісів. Горіння великих лісових масивів призводить до порушення лісових і прилеглих до лісів екосистем. При цьому суттєво скорочується біорізноманіття, зменшується чисельність представників флори та фауни, в тому числі, що належать до Червоної книги. Загибель лісів призводить до зникнення малих річок і озер, до обміління більших річок і озер, до порушення водного балансу в цілому. Деякі населені пункти можуть залишитися без води, яку вони споживають з колодязів. Водойми забруднюються попелом і сажею.

До цього необхідно додати ризики екологічних небезпек для населення, втрати будівель і майна, необхідність евакуації під час лісових пожеж, втрати здоров'я та смертність людей.

Під час горіння лісових масивів страждають на глибину до 50 см ґрунти та все, що в них знаходиться, гинуть корисні ґрунтові мікроорганізми, збільшується ймовірність ерозії ґрунту, може помітно знижуватись родючість ґрунту.

Екологічні наслідки горіння трав'янистих покривів. На перший погляд інтенсивність горіння трави значно менше інтенсивності горіння лісів. Тому і екологічні наслідки повинні бути значно меншими. Але це не зовсім так. Під час горіння трав'янистих ма-

сивів гинуть багато комах, їхні личинки, куколки, божі корівки, жулички, дощові черв'яки та ін. Важливо, що перераховані біоорганізми приймають участь в утворенні ґрунтів. Під час пожеж спалюється солі важких елементів, що осіли на листях, гумусний шар ґрунту. Плодючість землі зменшуються на термін більше семи років. Після пожеж збіднюється видовий склад лугової рослинності та тваринного світу. Територія, що звільнилася від пожежі, захоплюється бур'янами. Крім корисної мікрофлори, комах і інших дрібних біоб'єктів, гинуть їжаки, птахи, жаби, плазуни, дрібні ссавці. Під час пожеж згорає органіка, що забезпечує пухкість ґрунту, його вологоємність, здатність утримувати елементи мінерального живлення, випаровуються азотисті речовини. Після трав'янистих пожеж знижується родючість ґрунту, підсилюється його ерозія.

Від згорання трави страждають кущі та дерева. Важливо, що разом з травою може згорати токсичне побутове сміття, залишки добрив і ядохімікатів. При цьому утворюються леткі токсичні органічні та неорганічні сполуки.

Екологічна ситуація різко погіршувалася через наявність великої кількості продуктів вибухів. Саме ці вибухи й викликали масштабні трав'яні пожежі.

З 29 вересня 2024 р. на декілька днів екологічна ситуація різко погіршилася внаслідок пилової бурі, що прийшла в Україну з Казахстану та Узбекистану. При цьому в східній частині України концентрація пилу в атмосфері збільшилася від $0,03 \text{ мг/м}^3$ до 5 мг/м^3 . Прозорість атмосфери при цьому за питомого коефіцієнта екстинкції $3 \cdot 10^2 \text{ м}^2/\text{кг}$, товщини атмосферного шару 1000 м зменшилася в 5 – 5,5 разів. Продукти горіння разом з пилом призвели до вкрай небезпечної ситуації для екосистем і людини зокрема.

Висновки

Горіння лісових масивів і трав'янистих покривів в Україні на межі літо - осінь 2024 р. було катастрофічними. Найбільше постраждали повітря, ґрунти, флора та фауна в східній частині країни. Викиди диму, сажі, оксидів азоту в рази перевищували фонові значення мас цих речовин. Зокрема, інжекція ПАВ перевищувала фонові значення у 570, мікрочастинок $PM_{2,5}$ – у 14 разів, потужність акустичного випромінювання – у 30 разів.

Обґрунтовано, що більшість пожеж були викликані військовими діями на території України. Поширенню пожеж у екосистемах, крім військових дій, сприяла висока температура повітря, відсутність дощів та вітер.

Короткочасні та тривалі екологічні наслідки були дуже значними. Масштабні пожежі, викликані військовими діями, кваліфікуються як екоцид.

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. Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко, Г. В., Чорногор 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. Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко А. В., Чорногор 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. 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. № 26. С. 43-54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04>
5. Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор 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. Ecological consequences of the large forests fires in the northern hemisphere during 2020. Sustainable development of natural and economic systems: theory, methodology, and practice: collective monograph. / Under the general edition of Lidiia Horoshkova, Iegen Khlobystov. 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., Krainyuk 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. 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 20.09.2024

Стаття рекомендована до друку 18.11.2024

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

Corresponding Member of NAS of Ukraine,

Head of the Space Radio Physics Department

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/0000-0002-5313-8850>

¹V. N. Karazin Kharkiv National University,

4, Svobody Sq., 61022, Kharkiv, Ukraine

PARAMETERS AND ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF CATASTROPHIC FIRES IN UKRAINE: MODELING, QUANTITATIVE ESTIMATES

Climatic conditions and the intensification of hostilities in the east of Ukraine in 2024 (August and September) led to the burning of large areas of forests and grasslands. A quantitative assessment of their consequences is necessary.

Methods. System analysis, multifactorial analysis, mathematical modeling.

Purpose. Calculation of the main parameters of fires in the ecosystems of Ukraine, which took place in the summer-autumn of 2024, and assessment of their ecological consequences.

The results. The main energy parameters of forest and grass fires caused by the summer heat and military operations in Ukraine in 2024 were calculated. In late August - early September, virtually the entire east of Ukraine was burning. A total of about 43,000 hectares were engulfed in flames in Ukraine. About 500 kt of wood and 350 kt of grass burned. Emissions of smoke, soot, and nitrogen oxides exceeded the background values of the masses of these substances many times over. The injection of polyaromatic hydrocarbons exceeded the background values by 570, PM 2.5 microparticles by 14 times, and the power of acoustic radiation by 30 times. CO, SOx emissions

did not exceed several tens of percent. The spread of fires in ecosystems, in addition to military operations, was facilitated by high air temperature, lack of rain and wind.

Conclusions. Calculations and mathematical modeling showed that the consequences of the burning of forests and grasslands in Ukraine in 2024 were catastrophic. It is substantiated that most of the fires were caused by military actions on the territory of Ukraine. The ecological situation became significantly more complicated under the influence of a dust storm that came from Kazakhstan and Central Asia. The short-term and long-term environmental consequences are very significant.

KEYWORDS: forest fire, grass burning, ecosystem, energy parameter, injection, combustion product, chemical element, environmental consequences

References

1. Drysdale, D. (2011). An Introduction to Fire Dynamics, (2nd ed.). 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). Ecological consequences of the large forest fires in the northern hemisphere during 2020. Sustainable development of natural and economic systems: theory, methodology, and practice: collective monograph. Horoshkova, L. & Khlobystov, Ie. (Eds.) 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. VinSmartEco: materials of the international scientific and practical conference (Vinnytsia, May 16-18, 2019). Vinnytsia, 25-26. (In Ukrainian)
11. 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>
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 land-scape 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., 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., Hat-ten, 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., Brazian, 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., 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>
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 20.09.2024

The article is recommended for printing 18.11.2024