

УДК (UDC): 630, 551.5:504.54

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07>

Л. Ф. ЧОРНОГОР<sup>1</sup>, д-р фіз.-мат. наук, проф., А. Н. НЕКОС<sup>1</sup>, д-р геогр. наук, проф.,  
Г. В. ТІТЕНКО<sup>1</sup>, канд. геогр. наук, доц., Л. Л. ЧОРНОГОР<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна  
майдан Свободи 6, 61022, м. Харків, Україна

e-mail: [Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua](mailto:Leonid.F.Chernogor@univer.kharkov.ua)  
[alnekos999@gmail.com](mailto:alnekos999@gmail.com)  
[titenko@karazin.ua](mailto:titenko@karazin.ua)  
[Leonid.L.Chernogor@gmail.com](mailto:Leonid.L.Chernogor@gmail.com)

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>  
<https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>  
<http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>  
<https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

## ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ В УКРАЇНІ НАВЕСНІ – ВЛІТКУ – ВОСЕНІ 2020 р.

**Мета.** Аналіз і оцінка кількісних показників екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р., які мали місце переважно у Київській, Житомирській, Луганській і Харківській областях.

**Методи.** Аналіз інформації, теоретико-розрахункові, математичне моделювання, системний аналіз.

**Результати.** Продемонстровано, що великомасштабні лісові пожежі в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. мали дуже значні екологічні наслідки. Суттєво постраждали екосистеми на території площі понад 23200 га. Втрачено близько 2 Мт деревини. Установлено, що в атмосферу викинуто до 1 Мт диму та біля 7 кт сажі, що перевищило середній фоновий вміст цих речовин в атмосфері над всією територією України в 15,5 та більше ніж в 10 раз відповідно. Значними були викиди чадного газу (понад 230 кт), вуглеводнів (до 0,1 Мт), двоокису вуглецю (до 5,2 Мт). Істотними були викиди інших хімічних елементів (від десятків – сотень кілотонн для азоту до десятків – сотень кілограм для важких хімічних елементів). До атмосфери надійшло понад 20 ПДж теплової енергії, що еквівалентно енергії вибуху 5-мегатонної бомби. Середня потужність горіння перевищувала 46 ГВт, що можна порівняти з потужністю всіх видів енергії, яку споживає Україна (близько 150 ГВт). До атмосфери надійшло близько 70 ТДж енергії акустичного випромінювання, що вдвічі перевищило її середній фоновий вміст в атмосфері над усією територією України. Значна частина цієї енергії припадала на шкідливий для біосфери (людини) інфразвуковий діапазон. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж 2020 р. для України стали рекордними. Точніше, мова йде про своєрідний антирекорд.

**Висновки.** Показано, що екологічні наслідки були рекордними, точніше антирекордними. Для повного відновлення лісових масивів потрібен інтервал часу від 10 до 100 років.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** великомасштабні лісові пожежі, екологічні наслідки, викиди продуктів горіння, викиди тепла, енергетика акустичного випромінювання

Chernogor L. F.<sup>1</sup>, Nekos A. N.<sup>1</sup>, Titenko G. V.<sup>1</sup>, Chornohor L. L.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>V. N. Karazin Kharkiv National University, Svoboda Square, 6, 61022, Kharkiv, Ukraine

## ECOLOGICAL CONSEQUENCES OF LARGE-SCALE FOREST FIRES IN UKRAINE IN SPRING – SUMMER – AUTUMN 2020

**Purpose** of the study is analysis and assessment of quantitative indexes of the environmental consequences of large-scale forest fires in Ukraine in spring – summer – autumn 2020, which took place mainly in Kyiv, Zhytomyr, Lugansk and Kharkiv regions.

**Methods.** Information analysis, theoretical and computational, numerical simulation, system analysis.

**Results.** The large-scale forest fires in Ukraine in spring – summer – autumn 2020 had very significant environmental consequences was demonstrated. Ecosystems on an area of more than 23,200 hectares have been significantly affected. About 2 Mt of timber was lost. It was found that up to 1 Mt of smoke and about 7 kt

© Чорногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Чорногор Л. Л., 2021



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/).

of soot was emitted into the atmosphere, which is 15,5 times higher and more than 10 times higher than its average background content in the atmosphere over the entire territory of Ukraine. The emissions of carbon monoxide (over 230 kt), hydrocarbons (up to 0,1 Mt), and carbon dioxide (5,2 Mt) were significant. Emissions of other chemical elements (from tens and hundreds kilotons for nitrogen to tens and hundreds of kilograms for heavy chemical elements) were significant. More than 20 PJ of thermal energy entered the atmosphere, which is equivalent to the explosion energy of a 5-megaton bomb. The average combustion power exceeded 46 GW, which is comparable to the power of all types of energy consumed by Ukraine (about 150 GW). About 70 TJ of acoustic radiation energy entered the atmosphere, which doubled its average background content in the atmosphere over the entire territory of Ukraine. A significant part of this energy fell on the infrasonic range, which was harmful to the biosphere (man). The ecological consequences of large-scale forest fires in 2020 for Ukraine have become record-breaking. More precisely, we are talking about a kind of anti-record.

**Conclusions.** The environmental consequences were record-breaking, or rather anti-record, is shown. Full restoration of forest areas requires a time interval equal of 10 to 100 years.

**KEYWORDS:** large-scale forest fires, environmental consequences, emissions of combustion products, heat emissions, energy of acoustic radiation

Черногор Л. Ф.<sup>1</sup>, Некос А. Н.<sup>1</sup>, Титенко А. В.<sup>1</sup>, Черногор Л. Л.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, площадь Свободы, 6, г. Харьков, Украина, 61022

### ЕКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ В УКРАИНЕ ВЕСНОЙ – ЛЕТОМ – ОСЕНЬЮ 2020 г.

**Цель.** Анализ и оценка количественных показателей экологических последствий крупномасштабных лесных пожаров в Украине весной – летом – осенью 2020 г., которые имели место преимущественно в Киевской, Житомирской, Луганской и Харьковской областях.

**Методы.** Анализ информации, теоретико-расчетные, численное моделирование, системный анализ.

**Результаты.** Продемонстрировано, что крупномасштабные лесные пожары в Украине весной – летом – осенью 2020 г. имели весьма значительные экологические последствия. Существенно пострадали экосистемы на территории площадью более 23200 га. Потеряно около 2 Мт древесины. Установлено, что в атмосферу выброшено до 1 Мт дыма и около 7 кт сажи, что превысило среднее фоновое содержание этих веществ в атмосфере над всей территории Украины в 15,5 и более чем в 10 раз соответственно. Значительными были выбросы угарного газа (более 230 кт), углеводородов (до 0,1 Мт), двуокиси углерода (5,2 Мт). Существенными были выбросы других химических элементов (от десятков – сотен килотонн для азота до десятков – сотен килограмм для тяжелых химических элементов). В атмосферу поступило более 20 ПДж тепловой энергии, что эквивалентно энергии взрыва 5-мегатонной бомбы. Средняя мощность горения превышала 46 ГВт, что сопоставимо с мощностью всех видов энергии, потребляемой Украиной (около 150 ГВт). В атмосферу поступило около 70 ТДж энергии акустического излучения, что вдвое превысило ее среднее фоновое содержание в атмосфере над всей территорией Украины. Значительная часть этой энергии приходилась на вредный для биосферы (человека) инфразвуковой диапазон. Экологические последствия крупномасштабных лесных пожаров 2020 г. для Украины стали рекордными. Точнее, речь идет о своеобразном антирекорде.

**Выводы.** Показано, что экологические последствия были рекордными, точнее антирекордными. Для полного восстановления лесных массивов нужен интервал времени от 10 до 100 лет.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** крупномасштабные лесные пожары, экологические последствия, выбросы продуктов горения, выбросы тепла, энергетика акустического излучения

### Вступ

Проблема великомасштабних лісових пожеж має велике соціальне, економічне та екологічне значення. Під час лісових пожеж страждають усі складові екогеосистем: атмосфера, літосфера, ґрунтовий покрив, гідросфера, флора та фауна, населення та біосфера в цілому. Одним із перших дослідників впливу пожеж на ліси був Мелехов І. С. [1]. Основоположні роботи щодо впливу пожеж на лісові масиви були виконані у другій

половині ХХ століття [2–10]. Значна частина досліджень, пов'язаних із лісовими пожежами, виконана у колишньому СРСР/Росії [11–22]. Це обумовлено тим, що площа лісів у колишньому СРСР складала 1,2 млрд. га, а в Росії – 0,76 млрд га [15, 16]. Щорічно в Росії лісові пожежі знищують до 10 млн га, тобто близько 1%, лісів. Визначний вклад в дослідження лісових пожеж та їх впливів на довкілля в Росії внесли Андрєєв Ю. А. [14], Воробйов

Ю. Л. [15], Гришин А. М. [6–9, 16], Ісаєва Л. К. [11, 12], в Україні – Буц Ю. В. [23–25], Кузик А. Д. [26, 27], Ліщина В. О. [28], Некос В. Ю. [29], в світі – Sparr H. S. [3], Komarek E. V. [4], Boer M. M. [30], Khabarov N. [31], Silva S. [32], Dhall A. [33], Randerson I. T. et al. [34] та багато інших.

Ісаєва Л. К. є фундатором нового наукового напрямку, який полягає в систематичному вивченні екологічних аспектів пожеж, які дозволяють оцінювати ризики та прогнозувати майбутні ризики та небезпеки, обумовлені пожежами, які мають за мету підвищення рівня захисту людей і територій [11, 12]. Автор за допомогою розрахунково-аналітичних і експериментальних методів оцінила вплив екологічних наслідків пожеж на довкілля.

Гришин А. М. заснував науковий напрямок, пов'язаний із фізикою лісових пожеж і їх математичним моделюванням [6–9, 16].

Буц Ю. В. у багатьох публікаціях обґрунтував теоретично-методологічні оцінки техногенного ризику пірогенного походження та ймовірність ураження пожежами екогеосистем [23–25]. Автор розглядав чинники, прояви та наслідки постпірогенної релаксації екогеосистем, описав на конкретних прикладах постпірогенну релаксацію, сформулював рекомендації щодо екологічно безпечного управління процесами постпірогенної релаксації екогеосистем.

Причини виникнення та наслідки лісових пожеж теоретичними та експериментальними методами досліджуються досить давно [20, 21, 23]. При цьому основна увага приділяється прогнозуванню та запобіганню лісових пожеж [21], математичному моделюванню лісових пожеж, а також механізму виникнення верхових пожеж [10, 11, 13, 19, 26].

У цій роботі лише розглянемо екологічні аспекти дослідження великомасштабних лісових пожеж. Попередні результати досліджень авторів на цю тему опубліковано в [35, 36].

Актуальність цієї теми полягає у наступному. Людство живе в епоху глобального потепління. Причинами глобального потеп-

ління є зростання чисельності населення, подальший техногенний вплив, який супроводжується викидами в атмосферу тепла, шкідливих речовин, газів і, зокрема, вуглекислого газу. Збільшення маси останнього призводить до активізації процесу, іменованого парниковим ефектом.

Глобальне потепління супроводжується як суттєвими змінами клімату на планеті, так і особливостями змін погодних умов у регіонах. Глобальне потепління значною мірою впливає і на погодно-кліматичні зміни в Україні. Збільшення температури всього на 1°C призводить до виникнення у середньому 240 нових осередків пожеж [25]. В останні роки середня температура у весняно – літньо – осінній періоди збільшилася на 4–5°C. При цьому різко зменшилася кількість опадів. Так, зима 2019–2020 рр. в Україні була практично безсніжною; весна, більша частина літа та перша половина осені в центральній, східній і південній частинах України відрізнялися відсутністю рясних дощів. Однак, від сильних дощів часом страждала західна частина України.

Підвищення температури та зменшення кількості опадів призвело до негативних наслідків. Вже на початку квітня 2020 р. виникли перші сильні та тривалі пожежі в Київській і Житомирській областях, включаючи і Чорнобильську зону. На початку вересня 2020 р. загорілися лісові масиви в Харківській і Луганській областях. Однак найбільші пожежі відзначалися в Луганській області з 30 вересня до 5–7 жовтня 2020 р.

Слід зауважити, що великомасштабні лісові пожежі в Україні призвели до серйозних екологічних наслідків. Проте оцінка кількісних показників екологічних наслідків пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. у наукових публікаціях майже відсутня.

Мета роботи – аналіз і оцінка кількісних показників екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р.

## Методи

Вихідні дані для цього дослідження щодо характеристик пожеж (такі як розташування великомасштабної лісової пожежі, час її існування, уражені площі, засоби гасіння пожежі тощо) запозичені з офіційних даних мережі Internet [37–44].

Для дослідження екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж в Україні використовувалися такі методи: аналіз інформації, теоретичні розрахунки, математичне моделювання та системний аналіз усього комплексу ефектів. Моделюванню підлягали

кількісні показники енергії та потужності пожеж (теплова енергія та потужність), процесів викидів маси диму, сажі, чадного газу, вуглекислоти, азоту, важких хімічних елементів, енергія та потужність інфразвукового випромінювання.

Методика аналізу екологічних наслідків великомасштабних пожеж розроблялася рядом авторів [45–50]. Найбільш повно методика описана у публікаціях [49, 50], яка і була використана авторами цієї роботи.

Енергія пожежі оцінювалася за питомою (на одиницю площі) масою горючих речовин та площею пожежі. Орієнтовні значення питомої маси представлено в табл. 1.

Для спрощення розрахунків обрано середню для лісостепової зони України питому масу горючих матеріалів, що дорівнює 10 кг/м<sup>2</sup>.

Згідно з [49, 50], з урахуванням неповного згоряння за масою горючих матеріалів

Таблиця 1

Питома маса горючих матеріалів  
Specific mass of combustible materials

Table 1

Матеріал	Ліс	Кущі	Трави
Питома маса, кг/м <sup>2</sup>	20–60	2–5	0,5–1,5

оцінювалася маса вуглекислоти (газу CO<sub>2</sub>), що дорівнює 2,25 масам горючих матеріалів. Маса СО становить близько 10% від маси згорілих матеріалів. Маса сажі (С) складає близько 0,3% від маси згорілих матеріалів. Маса диму близька до 4% від маси

матеріалів [49, 50]. Маса вуглеводнів досягає 40% від маси згорілих матеріалів. Енергія акустичного випромінювання становить 0,3% від енергії пожежі. Аналогічне співвідношення має місце і для потужностей цих процесів [49, 50].

### Результати первинного аналізу стану лісових пожеж

Спочатку опишемо стан великомасштабних лісових пожеж, необхідний для подальшого математичного моделювання їх екологічних наслідків.

**Лісові пожежі на Київщині та Житомирщині у квітні – травні 2020 р.** Пожежі тривали з 4 квітня по 3 травня 2020 р. (рис. 1). Площа лісу, пройдена пожежею, складала приблизно 2700 га. Пожежа виникла 4 квітня 2020 р. в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Був сильний вітер, пожежа стала верховою. Швидкість поширення таких пожеж досягає 8–16 м/с. Вогонь поширився на чотири лісництва. Пожежу в зоні відчуження гасили 15 діб. 16 квітня виникли нові осередки. Пожежу гасили 1202 людини, було залучено 289 одиниць техніки, в тому числі 2 літаки АН-32П, 4 вертольоти. Скинуто було понад 268 т води [37]. Радіаційний фон, на щастя, залишався в межах норми. Постраждало під час пожежі 5% території Чорнобильського заповідника.

Не менш масштабними й пожежі в Житомирській області. Виникло дев'ять осередків. Вогнем знищено 39 будівель. У

гасінні пожежі брало участь 960 осіб, 156 одиниць техніки, 3 літаки АН-32П [38].

Через пожежі рівень забруднення повітря продуктами горіння у Києві та околицях на деякий час став найвищим у світі [39].

**Лісові пожежі на Харківщині.** Пожежі почалися 2 вересня 2020 р. Спочатку горів хвойний ліс на площі 80 га (рис. 2). Загальна площа, охоплена пожежами, становила близько 500 га, з них на 100 га спостерігалася верхова пожежа. В результаті пожеж знищено 22 будинки, евакуйовано 33 людини. Повністю згоріло село Вороб'ївка Дворічанського району. У гасінні пожежі брало участь 215 осіб, 49 одиниць техніки, в тому числі 2 пожежних літаки та 1 вертоліт. Висота полум'я сягала 40–50 м. Швидкість вітру була близько 15 м/с [40].

Вогонь знищив ділянку повітряних ліній (ЛЕП, лінії радіомовлення та телеграфу) протяжністю 1 км і 20 опор. Без світла залишилися 70 споживачів.

2 вересня 2020 р. великомасштабна пожежа була зафіксована також у Чугуївському районі. Вигорів ліс площею 30 га. У гасінні



a)



б)

**Рис. 1** – Пожежі у: а) – Житомирській області  
б) – Київській області у 2020 р. [<https://u.to/rvk0Gw>]  
**Fig. 1** – Zhytomyr region (a) and Kyiv region (b) fires in 2020  
[Available from: <https://u.to/rvk0Gw>]



**Рис. 2** – Пожежі у Харківській області у 2020 р. [<https://u.to/OPw0Gw>]  
**Fig. 2** – Kharkiv region fires in 2020 [Available from: <https://u.to/OPw0Gw>]

пожежі приймало участь 211 осіб, 19 одиниць техніки. Тільки за одну добу (23 вересня 2020 р.) на Харківщині відзначено 40 пожеж у різних типах екосистем. Загалом вигоріло понад 22 га лісів [41, 42].

**Лісові пожежі на Луганщині.** Пожежі на Луганщині розпочалися одночасно з пожежами на Харківщині. Уже в перші дні загинула 1 людина, а ще 2 людини потрапили в лікарню з опіками. Горів хвойний ліс площею 80 га (рис. 3). Однак справжня катастрофа розпочалася на Луганщині 30 вересня 2020 р. Пожежа тривала зі змінною інтенсивністю всю першу декаду жовтня. Так, на 7 жовтня вдалося загасити 9 осередків з 10 [43]. За перші три доби вогонь пройшов близько 20 тис. га лісу.



Рис. 3 – Пожежі в Луганській області у 2020 р.  
[\[https://u.to/a-w0Gw\]](https://u.to/a-w0Gw)



Fig. 3 – Lugansk region fires  
Retrieved from: <https://u.to/a-w0Gw>

### Результати аналізу екологічних наслідків пожеж

Наведемо результати оцінки екологічних наслідків великомасштабних пожеж окремо для кожної події. Результати розрахунків маси згорілих матеріалів, викидів продуктів горіння, енергії та потужності горіння, а також енергії та потужності акустичного випромінювання наведено в табл. 2.

Аналіз даних табл. 2 показав, що екологічні наслідки великомасштабних пожеж в Україні в 2020 р. були дуже значними. Пожежі охопили територію в 23200 га, зайняту переважно лісом, тобто 0,2% площі всіх лісів України. Було знищено сотні кілотонн деревини.

Добре відомо, що природне відновлення лісових ділянок відбувається по-різному та з різною швидкістю. Якщо пожежею були пошкоджені або знищені лише надземні

частини кущів, то за 2–3 роки відновиться чагарниковий ярус.

Після пожежі самовідновлюватися можуть скоріше за всі інші породи береза та осика. Лісовідновлення переважно є наслідком самосіву насіння, перенесеного з уцілених на згарищах дерев. При неповному згорянні підстилки частина насіння сосни зберігає схожість і утворює самосів. Трав'яна рослинність з'являється через 1–2 роки. Загалом, природне відновлення лісових порід може бути помітним через 2–3 роки [24].

Внаслідок масштабних пожеж на значних площах України сильно постраждали екосистеми різного ієрархічного рівня. До атмосфери потрапили десятки–сотні кілотонн диму, що в тисячі разів перевищило вміст диму над відповідними площами до.

Таблиця 2

Параметри екологічних наслідків великомасштабних пожеж  
у деяких регіонах України

Table 2

The ecological consequences parameters of large-scale fires  
at some Ukraine's region

Параметр	Київщина, Житомирщина	Харківщина	Луганщина	Фонове значення над Україною	Відносне збільшення, %
Площа, га	2700	500	20000	–	–
Маса згорілих матеріалів, Мт	0,27	0,05	2	–	–
Маса диму, кг	108	20	800	6	1550
Маса CO <sub>2</sub> , Мт	0,61	0,11	4,5	2760	0,19
Маса CO, кг	27	5	200	600	39
Маса С, кг	0,8	0,15	6	0,6	1160
Вуглеводні, кг	10,8	2	80	6000	1,6
Енерговиділення, ПДж	2,7	0,5	20	–	–
Середня тривалість, діб	30	5	5	–	–
Середня потужність, ГВт	1	1,16	46,3	–	–
Акустична енергія, ТДж	8,1	1,5	60	35	200
Акустична потужність, МВт	3	3,5	139	400	36,4

пожеж. Під дією вітру дим та інші продукти горіння розповсюдились на значній території (за добу приблизно на 1000 км). У результаті вміст диму у повітрі перевищив фонове значення над усією територією України в 15,5 разів. Концентрація вуглецю (сажі) перевищила фонове значення над усією територією України більше ніж в 10 разів.

Важливо, що сажа з атмосфери вимивається дощами. Маса чадного газу (CO) перевищила фонове значення над усією територією України більше ніж на 39%, а маса вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>) – на 0,19%. Маса вуглеводнів перевищила фонове значення над усією територією України на 1,6%. Істотними були викиди й інших хімічних елементів (табл. 3).

Таблиця 3

Маса хімічних елементів, емітованих при лісових пожежах в Україні в 2020 р.

Table 3

Chemical elements mass which emitted during forest fires at Ukraine in 2020

Хімічний елемент	N	K	Ca	Fe	Zn	Cr	Br	Mn	Pb	Rb, Sr, Se
Масові характеристики										
$\mu$ , кг/км <sup>2</sup> *	10 <sup>5</sup> –10 <sup>6</sup>	2–12	4–8	0,6– 3,7	0,07– 0,87	0,14– 0,65	0,07– 0,23	0,01– 0,29	0,04– 0,08	0,02– 0,05
$m_1$ , кг	2,7×10 <sup>6</sup> – 2,7×10 <sup>7</sup>	54– 324	108– 216	16,2– 99,9	1,9– 23,5	3,8– 17,6	1,9– 6,2	0,27– 7,8	1,1– 2,2	0,5– 1,4
$m_2$ , кг	5×10 <sup>5</sup> – 5×10 <sup>6</sup>	10– 60	40– 80	3– 18,5	0,4– 4,4	0,4– 3,3	0,4– 1,2	0,05– 1,5	0,2– 0,4	0,1– 0,25
$m_3$ , кг	2×10 <sup>7</sup> – 2×10 <sup>8</sup>	400– 2400	800– 1600	120– 740	14– 174	28– 130	14– 46	2–58	8–16	4–10
$m$ , кг	2,3×10 <sup>7</sup> – 2,3×10 <sup>8</sup>	464– 784	948– 1896	139– 859	16,3– 202	32,2– 151	16,3– 53,4	2,3– 67,3	9,3– 19,2	4,6– 11,7

\* ( $\mu$  – питома маса,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  і  $m$  – маси для Київщини та Житомирщини, Харківщини, Луганщини та їхня сума)

\* ( $\mu$  - specific weight,  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  and  $m$  – masses for Kyiv and Zhytomyr, Kharkiv, Luhansk and their sum)

При побудові табл. 3 використовувалася діапазон значень питомої маси, тобто маси, віднесеної до одного квадратного метра, хімічних елементів  $\mu$ , яка залежить від типу лісу, виду дерев, підстилаючої поверхні і т.п. Цей діапазон встановлений на підставі узагальнення опублікованих даних для різних лісових пожеж [15, 16, 17, 24].

Результати, наведені у табл. 3, показують, що маса азоту досягала десятків – сотень кілотонн, десятками – сотнями кілограм обчислювалися викиди K, Ca, Fe, Zn та Cr. Помітно меншими були викиди Br, Mn, Pb, Rb, Sr та Se.

Розрахунки показали, що дуже значним був акустичний ефект, який негативно вплинув на жителів навколишніх населених пунктів. Енергія акустичних коливань удвічі перевищувала фонове значення над усією територією України, а на околицях пожежі це перевищення становило близько 2000 разів. Дуже важливо, що 1–10% від енергії акустичних коливань припадає на енергію інфразвуку (частоти менше 20 Гц). Як відомо, інфразвук не сприймається безпосередньо вухами, але при цьому діє на всі органи людини, викликаючи страх, паніку та навіть психічні розлади.

### Висновки

Лісові пожежі в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. мали дуже значні екологічні наслідки. Постраждали екосистеми на території площею понад 23200 га. Втрачено близько 2 Мт деревини.

В атмосферу надійшло до 1 Мт диму, що в 15,5 разів перевищило його середній фоновий вміст в атмосфері над усією територією України. В процесі горіння до атмосфери потрапило близько 7 кт сажі, що більш ніж у 10 разів перевищило її середній фоновий вміст в атмосфері над усією Україною. Значними були викиди чадного газу (понад 230 кт), вуглеводнів (до 0,1 Мт), двоокису вуглецю (до 5,2 Мт). Істотними були викиди інших хімічних елементів (від одиниць кілотонн до одиниць кілограм).

До атмосфери надійшло понад 20 ПДж теплової енергії, що еквівалентно енергії вибуху 5-мегатонної бомби. Середня потужність горіння перевищувала 46 ГВт, що можна порівняти з потужністю всіх видів енергії, яку споживає Україна (близько 150 ГВт).

До атмосфери надійшло близько 70 ТДж енергії акустичного випромінювання, що вдвічі перевищило її середній фоновий вміст в атмосфері над усією територією України. Значна частина цієї енергії припадала на шкідливий для біосфери (людини) інфразвуковий діапазон.

Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж 2020 р. для України стали рекордними, а точніше антирекордними.

### Конфлікт інтересів

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

### Література

1. Мелехов И. С. Влияние пожаров на лес. Ленинград: Гослестехиздат, 1948. 126 с.
2. Курбатский Н. П. Проблема лесных пожаров. В кн.: *Возникновение лесных пожаров*. Москва: Наука, 1964. С. 5–60.
3. Sparr H. S. Forest ecology. N. Y., 1964. 541 p.
4. Komarek E. V. 8 – Effects of Fire on Temperate Forests and Related Ecosystems: Southeastern United States / in book *Fire and ecosystems*. (Kozlowski T. T.) New York–San Francisco–London: Academic Press, 1974. P. 251–277. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-424255-5.50013-4>
5. Доррер Г. А. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесная пром-сть, 1979. 160 с.
6. Гришин А. М. Математические модели лесных пожаров. Монография. Томск: Изд-во Томского университета, 1981. 278 с.
7. Гришин А. М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / Отв. ред. В. В. Пененко. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1992. 408 с.



8. Гришин А. М. Физика лесных пожаров. Изд-во: Томск: ТГУ, 1994. 218 с.
9. Гришин А. М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения. *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32, №5. С. 35–54.
10. Свириденко В. Є. Лісова пірологія. К.: Агропромвидав України, 1999. 172 с.
11. Исаева Л. К. Экологические последствия пожаров: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: Академия государственной противопожарной службы МВД России, 2001. 108 с.
12. Исаева Л. К. Пожары и окружающая среда. М.: Изд. Дом «Калан». 2001. 222 с.
13. Кондратьева Л. М. Многофакторность воздействия лесных пожаров на компоненты биосферы. Охрана лесов от пожаров в современных условиях. Хабаровск: Изд-во КПБ, 2002. С. 236–241.
14. Андреев Ю. А. Влияние антропогенных и природных факторов на возникновение пожаров в лесах и населённых пунктах: дис. ... д-ра техн. наук. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. 333 с.
15. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы. Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева. Москва: МЧС России, ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
16. Гришин А. М., Петрин С. В., Петрина Л. С. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 3. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. 575 с.
17. Бурасов Д. М. Математическое моделирование низовых, лесных и степных пожаров и их экологических последствий: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: ТГУ, 2006. 182 с.
18. Соловьев С. В. Экологические последствия лесных и торфяных пожаров: дис. ... канд. техн. наук. Москва: Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2006. 222 с.
19. Доррер, Г. Динамика лесных пожаров: монография. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2008. 404 с.
20. Гармышев В., Зырянов В., Матюшин В. Экологические последствия лесных пожаров на территории Иркутской области: монография. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2009. 145 с.
21. Коморовский В. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли: дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Сибирский государственный технологический университет, 2010. 154 с.
22. Перминов В. Математическое моделирование возникновения верховных и массовых лесных пожаров: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет. 2010. 282 с.
23. Буц Ю. В. Про математичне моделювання пожеж в природних екосистемах. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. №3–4. С. 17–22.  
URL: <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/896/681>
24. Буц Ю. В., Ластков Д.О., Васенко А.Г. Современное состояние проблемы влияния пожаров на геосистемы различных природных зон территории Украины. *Научно-методические и прикладные аспекты экологизации: Монография*. Под общ. ред. И. Ю. Швеца. Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. С. 7–30.
25. Буц Ю. В. Науково-методологічні основи релаксії екогеосистем при техногенному навантаженні пірогенного походження: дис. ... д-ра техн. наук. Суми: СумДУ, 2020. 399 с.
26. Кузик А. Д. Лісові пожежі та їх екологічні аспекти. *Вісник ЛДУ БЖД*. Львів. 2010. № 4. С. 124–128.
27. Кузик А.Д. Математичне моделювання пожежної небезпеки лісів. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2011. Вип. 21.16. С. 104–112.
28. Ліщина В. О. Математичне моделювання виникнення та розповсюдження лісових пожеж: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.05.03. Київ: Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», 2011. 22 с.
29. Некос В.Ю. Проблема впливу пожеж на стан рослинного покриву. *Людина і довкілля. Проблеми неоекології*. Харків. № 1–2, 2008. С. 21–25.
30. Boer M. M., Resco de Dios V., Bradstock R.A. Unprecedented burn area of Australian mega forest fires. *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. Pp. 171–172. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0716-1>
31. Khabarov N., Krasovskii A., Obersteiner M., Swart R., Dosio A., San-Miguel-Ayanz J., Durrant T., Camia A., Migliavacca M. Forest fires and adaptation options in Europe. *Regional Environmental Change*. 2016. Vol. 16. Pp. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0621-0>
32. Silva S., Fearnside P., Graça P., Brown I., Alencar A., Melo A. Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon. *Forest Ecology and Management*. 2018. Vol. 424. Pp. 312–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.041>
33. Dhall A., Dhasade A., Nalwade A., V. K M. R., Kulkarni V. A survey on systematic approaches in managing forest fires. *Applied Geography*. 2020. Vol. 121. Article No. 102266. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102266>
34. 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, Is. G4. Article no. G04012. DOI: <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>

35. Титенко А. Черногор Л., мл. Экологические последствия крупномасштабных лесных пожаров в Украине весной–осенью 2020 г. Л. *Охорона довкілля: зб. наук. статей XVI Всеукраїнських наукових Таліївських читань*. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С.164–166.
36. Черногор Л., мол. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні у 2020 р. Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: матеріали VIII міжнар. наук. конф. молодих вчених. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 33–35.
37. Пожежа в Чорнобильській зоні поширилася на територію понад 100 гектарів. (2020). URL: <https://www.rbc.ua/ukr/news/pozhar-chernobylskoy-zone-rasprostranilsya-1586073354.html> (дата звернення: 20.04.2021).
38. Пожежі на Житомирщині: вогонь знищив 39 будівель. (2020). URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3008717-pozezi-na-zitomirsiniv-vogon-znisiv-39-budivel.html> (дата звернення: 12.04.2021).
39. У Києві наразі фіксують найвищий рівень забруднення повітря у світі. URL: <https://hromadske.ua/posts/ukiyevi-narazi-fiksuyut-najvishij-riven-zabrudnennya-povitrya-u-sviti> (дата звернення: 21.04.2021).
40. Урядовий портал. Оперативна інформація щодо пожеж в екосистемах на території Харківської області (станом на 7:00 3 вересня). URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/operativna-informaciya-shchodo-pozhezh-v-ekosistemah-na-teritoriyi-harkivskoyi-oblasti-standom-na-700-3-veresnya> (дата звернення: 15.04.2021).
41. ДСНС України. Пожежі в природних екосистемах на території Луганської області, які виникли 30 вересня та 1 жовтня ліквідовані. URL: <https://www.dsns.gov.ua/ua/Nadzvichayni-podiyi/114930.html> (дата звернення: 02.04.2021).
42. Головне управління ДСНС України у Харківській області. Дворічанський район: триває ліквідація масштабної лісової пожежі (ОНОВЛЕНО, ВІДЕО). URL: <https://kh.dsns.gov.ua/ua/Nadzvichayni-podiyi/14725.html> (дата звернення: 02.04.2021).
43. Масштабні лісові пожежі на Луганщині: текстовий онлайн. URL: <https://hromadske.ua/posts/masshtabniliisovi-pozhezi-na-luganshini-tekstovij-onlajn> (дата звернення: 11.04.2021).
44. ГУ ДСНС України у Луганській області. Луганщина. Час важких випробувань... URL: <https://lg.dsns.gov.ua/ua/Ostanni-novini/10464.html> (дата звернення: 02.04.2021).
45. Будыко М., Голицын С., Израэль Ю. Глобальные климатические катастрофы: Влияние ядерного конфликта на климат. М.: Гидрометеиздат, 1986. 159 с.
46. Климатические и биологические последствия ядерной войны / Отв. ред. Е. Велихов. М.: Наука, 1987. 288 с.
47. Питток Б., Акерман Т., Крутцен П. Последствия ядерной войны. Физические и атмосферные эффекты. пер. с англ. М.: Мир, 1988. 392 с.
48. Последствия ядерной войны. Воздействие на экологию и сельское хозяйство / М. Харуэлл, Т. Хатчинсон, У. Кроппер и др. пер. с англ. М.: Мир, 1988. 551 с.
49. Черногор Л. Физика и экология катастроф: монография. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
50. Черногор Л. Космос, Земля, человек: актуальные проблемы. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2017. 384 с.

## References

1. Melekhov, I. S. (1948). Influence of fires on forest. Moscow-Leningrad: Goslestechnizdat (In Russian)
2. Kurbatskii, N. P. (1964). The forest fire problem. In *The Origins of Forest Fires*. Moscow: Science (In Russian)
3. Sparr, H. S. (1964). Forest ecology. N. Y.
4. Komarek, E. V. (1974). 8 – Effects of Fire on Temperate Forests and Related Ecosystems: Southeastern United States. In Kozłowski T. T., *Fire and ecosystems*. (New York–San Francisco–London: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-424255-5.50013-4>
5. Dorrer, G.A. (1979). Mathematical Models of Forest Fire Dynamics. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ. (In Russian)
6. Grishin, A. M. (1981). Mathematical Models of Forest Fires. Tomsk: TGU Publ. (In Russian)
7. Grishin, A. M. (1992). Mathematical Modeling of Forest Fires and New Methods to Fight against Them. Novosibirsk: Nauka Publ. (In Russian)
8. Grishin, A. M. (1994). Physics of forest fires. Tomsk: TSU. (In Russian)
9. Grishin, A. M. (1996). General mathematical model for forest fires and its applications. *Combust. Explos. Shock Waves*, 32, 503–519. <https://doi.org/10.1007/BF01998573>
10. Svyrydenko, V. Ye. (1999). Forest pyrology. Kyiv: Agropromvydav (In Ukrainian)
11. Isaeva, L. K. (2001). The environmental consequences of fires: Doctor's thesis. Moscow: Academia GPS MVD RF. (In Russian)
12. Isaeva, L. K. (2001). Fires and the Environment. Moscow: Kalan Publ. (In Russian)
13. Kondratyeva, L. M. (2002). Multifactors of Forest Fire Impact on Biosphere Components. The forest protection from fires in modern conditions. Khabarovsk: KPB Publ (In Russian)

14. Andreev, Yu. A. (2003). *Influence of anthropogenic and natural factors on the occurrence of fires in forests and settlements*: Doctor's thesis. Moscow: FSA VNIPO EMERCOM of Russia (in Russian)
15. Vorobiev, Y., Akimov, V., & Sokolov, Y. (2004). *Forest fires in Russia: Status and Problems*. Moscow: EMERCOM of Russia, DEKS-PRESS (In Russian)
16. Grishin, A. M., Petrin, S. V. & Petrina, L. S. (2006). *The Modeling and Forecasting of the Catastrophes. Part III*. Tomsk: TSU (In Russian)
17. Burasov, D. M. (2006). *Mathematical Modelling of the Forest and Steppe Fires*: candidate's thesis. Tomsk: TSU (In Russian)
18. Soloviev, S. V. (2006). *Ecological Consequences of Forest and Peat Fires*: Extended abstract of candidate's thesis. Moscow: Academy of EMERCOM State Fire Service of Russia (in Russian)
19. Dorrer, G. (2008). *Dynamics of forest fires*: monograph. Novosibirsk: SB RAS Publ. (In Russian)
20. Garmyshev, V., Zyryanov, V. & Matyushin, V. (2009). *Environmental consequences of forest fires on the territory of the Irkutsk region*: monograph. Irkutsk: Irkutsk State University Publ. (In Russian)
21. Komorovskiy, V. (2010). *Control and forecasting of parameters of large forest fires as dynamic processes on the Earth's surface*: candidat's thesis. Krasnoyarsk: Siberian State Technological University. (In Russian)
22. Perminov, V. (2010). *Mathematical modeling of the emergence of the highest and massive forest fires*: Doktor's thesis. Tomsk: Tomsk State University (In Russian)
23. Buts, Yu. V. (2012). *Fire relaxation of geosystems about mathematical design of fires in natural ecosystems. Man and Environment. Issues of Neoecology*, (3-4), 17–22. Retrieved from <https://periodicals.karazin.ua/humanenviron/article/view/896/681> (In Ukrainian)
24. Buts, Yu. V., Lastkov, D.O., Vasenko, A.G. (2013). *The current state of the problem of the impact of fires on the geosystems of various natural areas of Ukraine*. In I. Yu. Shvets (Ed.), *Scientific methodical and applied aspects of ecologization: Monograph* (pp.7-30). Simferopol: DIAPI (In Russian)
25. Buts, Yu. V. *Scientific and methodological bases of relaxation of ecogeosystems under the technogenic loading of pyrogenic origin*: Doctor's thesis. Sumy: Sumy State University. Retrieved from <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76266> (In Ukrainian)
26. Kuzyk, A. D. (2010). *Forest fires and their ecological aspects*. Bulletin of LSU of Life Safety. 4, 124–128 (In Ukrainian)
27. Kuzyk, A. D. (2011). *Simulation of forest fire danger*. *Sci. Bulletin of Ukrainian National Forestry University of Ukraine*. 21.16, 104–112 (In Ukrainian) Retrieved from [https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21\\_16/104\\_Kuz.pdf](https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_16/104_Kuz.pdf)
28. Lishchyna, V. O. (2011). *A Mathematical Simulation of the Appearance and Propagation of the Forest Fires*: extended abstract of candidate's thesis. Kyiv: Open International University of Human Development «Ukraine» (In Ukrainian)
29. Nekos, V. Yu. (2008). *A Fires Influence Problem on vegetation*. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (1–2), 21–25. (In Ukrainian)
30. Boer, M.M., Resco de Dios, V. & Bradstock, R.A. (2020). *Unprecedented burn area of Australian mega forest fires*. *Nature Climate Change*, 10, 171–172. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0716-1>
31. Khabarov, N., Krasovskii, A., Obersteiner, M., Swart, R., Dosio, A., San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Camia, A. & Migliavacca M. (2016). *Forest fires and adaptation options in Europe*. *Regional Environmental Change*, 16., 21–30. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0621-0>
32. Silva, S., Fearnside, P., Graça, P., Brown, I., Alencar, A. & Melo A. (2018). *Dynamics of forest fires in the southwestern Amazon*. *Forest Ecology and Management*, 424, 312–322. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.041>
33. Dhall, A., Dhasade, A., Nalwade, A., V. K M. R. & Kulkarni, V. (2020). *A survey on systematic approaches in managing forest fires*. *Applied Geography*, 121, 102266. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102266>
34. Randerson, J., Chen, Y., van der Werf, G., Rogers, B. & Morton, D. (2012). *Global burned area and biomass burning emissions from small fires*. *Journal of Geophysical Research*. 117(G4), G04012. <https://doi.org/10.1029/2012JG002128>
35. Titenko, A. & Chernogor, L., Jr. (2020). *Environmental consequences of large-scale forest fires in Ukraine in Spring–Autumn 2020*. *Proceedings of the XVIIth All-Ukrainian Scientific Taliyivsky readings: Environmental protection*, Kharkiv, 2020, October 29-30 (pp.164-166). Kharkiv: V.N. Karazina KhNU. (In Russian)
36. Chernogor, L., Jr. (2020). *Environmental consequences of large-scale forest fires in Ukraine in 2020*. Ecology, neoecology, environmental protection and sustainable using of natural resources: materials of the VIII International Scientific Conference of Young Scientists. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 33–35 (In Ukrainian)
37. *Chernobyl region fires were propagated on more than 100-ha territory*. (2021, April 04). Retrieved from <https://www.rbc.ua/ukr/news/pozhar-chernobylskoy-zone-rasprostranilsya-1586073354.html> (In Ukrainian)

38. Fires in Zhytomyr region: the fire destroyed 39 buildings. (2021, April 02). Retrieved from <https://www.ukrinform.ua/rubric-regions/3008717-pozezi-na-zitomirskini-vogon-znisiv-39-budivel.html> (accessed: 12.04.2021). (In Ukrainian)
39. Kyiv currently has the highest level of air pollution in the world. (2021, April 04). Retrieved from <https://hromadske.ua/posts/u-kiyevi-narazi-fiksuyut-najvishij-riven-zabrudnennya-povitrya-u-sviti> (In Ukrainian)
40. Uryadovy portal. (2021, April 04). Operational information is available in ecosystems in the Kharkiv region (camped at 7:00 on Sunday 3). Retrieved from <https://www.kmu.gov.ua/news/operativna-informaciya-shchodo-pozhezh-v-ekosistemah-na-teritoriyi-harkivskoyi-oblasti-stanom-na-700-3-veresnya> (In Ukrainian)
41. The State Emergency Service of Ukraine. (2021, April 02). Fires in natural ecosystems in the Luhansk region, which occurred on September 30 and October 1, were eliminated. Retrieved from <https://www.dsns.gov.ua/ua/Nadzvichayni-podiyi/114930.html> (In Ukrainian)
42. The State Emergency Service of Ukraine. (2021, April 02). Dvorychanskyi district: large-scale forest fire is being eliminated (UPDATED, VIDEO). Retrieved from <https://kh.dsns.gov.ua/ua/Nadzvichayni-podiyi/14725.html> (In Ukrainian)
43. Large-scale forest fires in Luhansk region: text online. (2021, April 04). Retrieved from <https://hromadske.ua/posts/masshtabni-lisovi-pozhezhi-na-luganshini-tekstovij-onlajn> (In Ukrainian)
44. Main Department of the State Emergency Service of Ukraine in Lugansk region: Luhansk region. (2021, April 04). Time of hard trials... Retrieved from <https://lg.dsns.gov.ua/ua/Ostanni-novini/10464.html> (In Ukrainian)
45. Budyko, M., Golitsyn, S. & Izrael, Yu. (1986). Global climatic catastrophes: the impact of nuclear conflict on the climate. Moscow: Gidrometeoizdat (In Russian)
46. Velikhov E. (Eds.). (1987). Climatic and biological consequences of nuclear war. Moscow: Nauka (In Russian)
47. Pittock, A. B., Ackerman, T. P., Crutzen, P. J., MacCracken, M. C., Shapiro, C. S. & Turco, R. P. (1990). Environmental consequences of nuclear war (scope 28): Volume 1, Physical and atmospheric effects. Great Britain: Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)
48. Harwell, M. A., Hutchinson, T. C., Cropper Jr., W. P., Harwell, C. C. & Grover, H. D. (1985). Environmental consequences of nuclear war (scope 28): Volume II. Ecological and agricultural effects. United States: Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE)
49. Chernogor, L. F. (2012). Physics and Ecology of Disasters. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian)
50. Chernogor, L. F. (2017). Space, the Earth, Mankind: Contemporary Challenges. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian)

Отримана 10.04.2021

Переглянуто 26.04.2021

Прийнята до друку 12.05.2021