

ЕКОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕОСИСТЕМ

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-04>

УДК (UDC): 630, 551.5:504.54

Л. Ф. ЧОРНОГОР¹, д-р фіз.-мат. наук, проф.,

Завідувач кафедри космічної радіофізики

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

А. Н. НЕКОС¹, д-р геогр. наук, проф.,

завідувачка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти

alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

А. В. ТІТЕНКО¹, канд. геогр. наук, доц.,

директор навчально-наукового інституту екології

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

Л. Л. ЧОРНОГОР¹,

студент навчально-наукового інституту екології

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

ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ ГОРІННЯ ЛІСОВИХ МАСИВІВ У ПІВНІЧНІЙ ПІВКУЛІ В 2020 р.: РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ТА КІЛЬКІСНИХ РОЗРАХУНКІВ

Мета. Кількісна оцінка маси викидів продуктів горіння, хімічних елементів, енергії та потужності акустичного та теплового випромінювань, викликаних горінням великих лісових масивів у Північній півкулі.

Методи. Аналітичний огляд проблеми досліджень, теоретико-розрахункові, математичне моделювання, системний аналіз.

Результати. Встановлено, що великомасштабні пожежі в Північній півкулі у 2020 р. мали катастрофічні екологічні наслідки. Найбільш суттєвий вплив виявився внаслідок горіння лісів у Росії та США. Постраждали екосистеми площею близько 15 млн га. Безповоротно втрачено близько 3,5 Гт деревини. В атмосферу викинуто близько 140 Мт диму, понад 10 Мт сажі. Маса інжектваного газу СО склала близько 350 Мт. Маса викинутих до атмосфери вуглеводнів склала близько 140 Мт. В атмосферу додатково емітовано близько 7,8 Гт газу СО₂. До атмосфери викинуто сотні мегатон атомарного азоту, сотні тон калію та кальцію, а також від одиниць до десятків тон таких хімічних елементів, як Fe, Zn, Cr, Br, Mn, Pb, Rb, Sr і Se. Енергія акустичного випромінювання склала близько 100 ПДж, що майже в тисячу разів перевищило її енергію в нормальних умовах. Енергія слабкозатухаючого інфразвукового випромінювання склала 1–10 ПДж. Густина потоку теплового випромінювання досягала 56–160 кВт/м². Навіть після розподілу продуктів горіння лісів у приземному шарі атмосфери над усією землею кулею їх концентрація перевищувала концентрацію в нормальних умовах. У першу чергу це відноситься до диму, сажі та чадного газу. Економічний збиток від горіння лісів склав близько 750 млрд доларів США. Загибло та було травмовано десятки людей. Матеріальний і моральний збиток завдано багатьом тисячам людей.

Висновки. Екологічні наслідки горіння великих масивів лісів північної півкулі у 2020 р. для планети стали своєрідним рекордом.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: площа пожежі, горючий матеріал, енергетика пожежі, викиди продуктів горіння, екологічні наслідки

Як цитувати: Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Черногор Л. Л. Екологічні наслідки горіння лісових масивів у Північній півкулі в 2020 р.: результати моделювання та кількісних розрахунків. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Екологія»*. 2021. Вип. 25. С.42-54. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-04>

In cites: 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>

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

Вступ

Великомасштабні лісові пожежі на земній кулі – один із викликів, що стоїть перед нашою цивілізацією. Справа в тому, що під час лісових пожеж суттєво страждають усі складові екогеосистем, а саме атмосфера, ґрунтовий покрив, гідросфера, флора і фауна та біосфера в цілому. Проблема великомасштабних лісових пожеж має значні екологічні, економічні та соціальні наслідки.

Вплив пожеж на лісові масиви досліджується більше 50 років. Огляд основних робіт представлено в роботі авторів [1–3].

Причини виникнення лісових пожеж і їх наслідки як теоретично, так і експериментально досліджуються досить давно. Зазвичай основна увага приділяється прогнозуванню та запобіганню лісових пожеж. На цей час розроблено математичні моделі, вивчено механізми виникнення найбільш небезпечних лісових верхових пожеж [4–6]. У літературі відсутні теоретичні розрахунки та математичне моделювання екологічних наслідків горіння конкретних лісових масивів.

Так, дослідники лісових пожеж у своїх роботах описали екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. [1–3]. Показано, що екологічні наслідки були рекордними. У 2020 р. також виникали великомасштабні лісові пожежі у США, Іспанії, Греції, Росії та в інших країнах Північної півкулі. У такому аспекті представляє інтерес проблема дослідження екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж саме у Північній півкулі у 2020 р.

Актуальність подібного дослідження полягає у наступному. Сучасне людство живе в епоху глобального потепління, яке викликано подальшим зростанням чисельності населення на планеті, все зростаючим техногенним впливом. При цьому збільшуються викиди в атмосферу додаткового тепла, шкідливих речовин, газів і, зокрема, вуглекислоти. Збільшення маси цього газу веде до активізації парникового ефекту. В

результаті цього ефекту підвищується температура приземної атмосфери, збільшується ймовірність виникнення великомасштабних лісових пожеж, погіршення стану екогеосистем. Таким чином з'являється позитивний зворотний зв'язок в екогеосистемах, який веде до пришвидшення негативних екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж на планеті.

Навесні – влітку – восени 2020 р. у Північній півкулі спостерігалися рекордні за своєю інтенсивністю лісові пожежі. В результаті пожеж виникли серйозні екологічні наслідки. При цьому були знищені значні природні ресурси. Добре відомо, що ліси поглинають вуглекислий газ, збагачують атмосферу киснем. Горіння призвело до викидів вуглекислого газу, що сприяло прискоренню глобального потепління. При пожежах на великих територіях руйнуються екосистеми, зменшується біологічне різноманіття, завдається значної шкоди середовищу існування тварин і рослинності, гинуть корисні ґрунтові мікроорганізми, збільшується ймовірність ґрунтової повітряної ерозії. Після сильних пожеж нерідко знижується плодючість ґрунту. Пожежі призводять до погіршення якості питної води, ґрунтових вод, струмки і ріки після пожеж менше збагачуються водою. Водойми виявляються забрудненими попелом і сажею, що завдає шкоди водній фауні і флорі. Атмосфера суттєво забруднюється продуктами горіння лісових масивів. В атмосферу інжектуються потужне акустичне (в тому числі й шкідливе інфразвукове) випромінювання. Все це мало місце протягом лісових пожеж у 2020 р. Потрібна кількісна оцінка екологічних наслідків великомасштабних пожеж у 2020 р., що і зумовило актуальність даної роботи.

Метою роботи є кількісна оцінка викидів продуктів горіння, хімічних елементів енергії та потужності акустичного і теплового випромінювання внаслідок горіння лісових масивів Північної півкулі у 2020 р.

Методи досліджень

Для дослідження екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж використовувалися такі методи: аналітичний огляд проблеми досліджень, 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.

Загальні питання великомасштабних пожеж розглянуті у [7–10].

Окремі аспекти методики аналізу екологічних наслідків великомасштабних пожеж розроблялися низкою фахівців [11, 12]. Найбільш повно методика викладена в роботах [13, 14]. У даній роботі використано методику співавтора Чорногора Л.Ф. [13, 14].

При оцінці екологічних наслідків великомасштабних пожеж вихідними параметрами є площа пожежі S , питома маса горючих матеріалів \tilde{m} , а також коефіцієнти

перетворення маси горючих матеріалів у маси продуктів горіння. В якості останніх обрано масу диму, маси CO_2 , CO , C і вуглеводнів (CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8). Окремо оцінено маси інжектіваних в атмосферу хімічних елементів (N , K , Ca , Fe , Zn , Sr , Br , Pb и Se). При цьому за основу взято наступні співвідношення: маса диму $m_s = 0,04m$, $m_{\text{CO}_2} = 2,25m$, $m_{\text{CO}} = 0,1m$, $m_{\text{C}} = 3 \cdot 10^{-3}m$, маса вуглеводнів $m_h = 0,04m$.

Питома маса хімічних елементів, також емітованих при лісових пожежах, наведена в табл. 1 [15].

Таблиця 1

Питома маса хімічних елементів, емітованих при лісових пожежах

Table 1

Mass per surface area of chemical elements discharged during forest fires

Хім. елемент	Питома маса хімічних елементів											
	N	K	Ca	Fe	Zn	Cr	Br	Mn	Pb	Rb	Sr	Se
\tilde{m} , кг/м ²	0,1–1	(0,2–1,2)·10 ⁻⁵	(0,4–0,8)·10 ⁻⁵	(0,6–3,7)·10 ⁻⁶	(0,7–8,7)·10 ⁻⁷	(1,4–6,5)·10 ⁻⁷	(0,7–2,3)·10 ⁻⁷	(0,1–2,9)·10 ⁻⁷	(0,4–0,8)·10 ⁻⁷	(0,2–0,5)·10 ⁻⁷	(0,1–0,5)·10 ⁻⁷	(0,1–0,3)·10 ⁻⁷

Аналіз даних таблиці 1 показав, що найбільшу питому масу мають викиди атомарного азоту, значно меншу – калій і кальцій і ще меншу інші елементи.

Відомо, що у природних умовах питома маса диму складає $\tilde{m}_s \approx 10^{-5}$ кг/м², $\tilde{m}_{\text{CO}_2} \approx 4,6$ кг/м², $\tilde{m}_{\text{CO}} \approx 10^{-3}$ кг/м², $\tilde{m}_{\text{C}} \approx 10^{-6}$ кг/м², питома маса вуглеводнів – $\tilde{m}_h \approx 10^{-2}$ кг/м².

Питома маса лісових горючих матеріалів змінюється в широких межах. Для трави $\tilde{m} \approx 0,1–1$ кг/м², для чагарника $\tilde{m} \approx 1–5$ кг/м². Найменше значення питомої маси мають ліси в лісостеповій зоні (близько 10 кг/м²), а в

субтропіках і тропіках – $\tilde{m} \approx 60$ кг/м². Значення \tilde{m} , що використано в роботі наведено в табл. 2., з якої видно, що найбільша питома маса була в лісах США та Іспанії, а найменша – в Україні.

Пожежі супроводжуються потужними потоками теплового Π_t і акустичного Π_a випромінювання.

Густина потоку Π_t можна розрахувати за співвідношенням з [13]:

$$\Pi_t \approx \sigma(T^4 - T_0^4),$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(К⁴·м²) – стала Стефана – Больцмана, T – температура полум'я, T_0 – температура повітря. Далі вважалося, що $T_0 \approx 300$ К.

Таблиця 2

Параметри лісових пожеж

Table 2

Forest fires parameters

Параметр	Країна			
	США	Росія	Іспанія	Україна
Питома маса, кг/м ²	40	20	30	10
Характерний час вигорання, год	2,8	1,4	2,1	0,7

За даними [14], в енергію акустичного випромінювання E_a переходить близько 0,3% енергії E , що виділяється під час пожежі. При цьому потужність акустичного випромінювання $P_a \approx 0,003P$, де P – потуж-

ність, що виділяється при горінні. При цьому $\Pi_a = P_a/S$. У нормальних умовах $\Pi_a \approx 1$ мВт/м². Виходячи з цього, саме ці базові показники використані у роботі для розрахунків.

Результати первинного аналізу стану лісових пожеж

Лісові пожежі в Росії. Масштабні пожежі почалися вже в січні 2020 р. До 15 травня 2020 р. за даними Грінпіс вигоріло близько 13,5 млн га, а за російськими даними – всього 4,7 млн га, з них 1,9 млн га – ліси [16, 17].

На 28 червня 2020 р. Грінпіс повідомив, що в Росії пожежі пройшли 21 млн га, а офіційні органи Росії повідомили, що вогонь охопив територію в 12 млн га, з них 6,6 млн га – ліси. Пожежі в Росії тривали в серпні, вересні та жовтні 2020 р. (рис. 1.) Найбільше постраждали Бурятія, Забайкальський, Красноярський,

Приморський і Хабаровський краї, а також Брянська, Іркутська, Смоленська, Кемеровська і Єврейська автономна області. За добу площа пожеж збільшувалася на 5 тис. га. Найбільше постраждали ліси в Якутії, їх частка перевищувала 80% [17]. Найбільш сильні лісові пожежі відзначалися в травні (їх тривалість була не менше 30 діб) і в липні (тривалість близько 20 діб). Протягом двох місяців згоріло близько 12 млн га лісу. Завдана шкода склала близько 600 млрд доларів США.



Рис. 1 – Масштабна лісова пожежа в Російській Федерації влітку 2020 р.

[<https://opozhare.ru/posledstviya/statistika-lesnyh-pozharov>]

Fig. 1 – A large-scale forest fire in the Russian Federation in summer 2020 [Available from <https://opozhare.ru/posledstviya/statistika-lesnyh-pozharov>]



Рис. 2 – Масштабна лісова пожежа в штаті Каліфорнія (США) влітку 2020 р.

[<https://iz.ru/1050026/video/v-kalifornii-obiavili-rezhim-chs-iz-za-pozharov>]

Fig. 2 – A large-scale forest fire in the state of California (USA) in summer 2020 [Available from <https://iz.ru/1050026/video/v-kalifornii-obiavili-rezhim-chs-iz-za-pozharov>]

Лісові пожежі в США. Пожежі в 2020 р палахкотіли в 12 штатах. Найбільш масштабні з них мали місце в штатах Каліфорнія, Орегон і Вашингтон [18, 19].

Штат Каліфорнія. Пожежі в Каліфорнії почалися 2 серпня 2020 р., але вони були відносно слабкими. У середині серпня 2020 р. температура повітря часом досягала 50°C. Жаркий і сухий клімат сприяв виникненню так званих сухих блискавок. 16 серпня 2020 р. зареєстровано 200 блискавок за 30 хв. Всього за добу відзначено близько 2500 блискавок. Сухі блискавки спровокували 585 займань лісових масивів. Після цього виникли мегапожежі (рис. 2). Вони тривали з 18

серпня по 18 вересня 2020 р. Загальна площа пожеж склала 2,7 млн га.

На початку вересня в результаті пожеж над Каліфорнією з'явилися пірокумуляси, тобто піро-купчасто-дощові хмари, які досить швидко піднімалися вгору, аж до висоти 15 км. Подібні хмари виникають при виверженні потужних вулканів. Пірокумуляси формують власні метеосистеми, впливають на погоду далеко за межами великомасштабної пожежі. Частота виникнення блискавок при наявності таких хмар збільшується, провокуючи все нові осередки пожеж.

Мегапожежі супроводжувалися виникненням вогненних торнадо (вогненних смерчів) (рис. 3). У цих випадках висота



Рис. 3 – Унікальне явище – виникнення вогняного смерчу під час лісової пожежі в штаті Каліфорнія (США) влітку 2020 р.
[<https://newizv.ru/news/incident/17-08-2020/v-ssha-ob-yavili-evakuatsiyu-v-ozhidanii-ognennogo-tornado>]

Fig. 3 – A unique phenomenon of the occurrence of a tornado during a forest fire in California (USA) in summer 2020

[Available from <https://newizv.ru/news/incident/17-08-2020/v-ssha-ob-yavili-evakuatsiyu-v-ozhidanii-ognennogo-tornado>]

полум'я може збільшуватися від 50–60 м до 10 км. При цьому продукти горіння закидаються навіть у стратосферу. У стратосфері закинуті аерозолі (сажа) можуть перебувати місяцями і навіть роками. Саме сажа, поглинаючи сонячне випромінювання, суттєво змінює тепловий режим тропосфери і стратосфери. За вимірами супутникових приладів температура приземної атмосфери становила 191°C.

Через викиди великої кількості диму в денний час спостерігалися сутінки, майже не було видно Сонця, небо набуло темно-помаранчевий колір (настав «червоний день») (рис. 4). Дим пішов на схід, до середини вересня він досяг Європи.

В результаті пожеж загинуло 29 чоловік, знищено м. Парадайс, згоріло понад 4000 будівель, 120 тис. осіб евакуйовано. У Каліфорнії без електроенергії залишилося 172 тис. чоловік. У гасінні пожежі взяли участь 14 тис. фахівців. Економічний збиток склав 130–150 млрд доларів США.

Штат Орегон. Пожежею охопило близько 0,4 млн га. Евакуйовано 0,5 млн чоловік із загального числа жителів штату 4,2 млн чоловік, тобто близько 12%. Пожежа тривала більше 7 діб. Загинуло понад 20 осіб, десятки пропали безвісти. Знищено 5 невеликих міст, сотні будівель [19]. *Штат Вашингтон.* Палахкотіло 14 пожеж площею понад 0,2 млн га. Стихія тривала не менше 10 діб. Мали місце людські жертви, більше 10 осіб зникли безвісти [20].



Рис. 4 – Унікальне явище (червоний день), зумовлене масштабною лісовою пожежею в штаті Каліфорнія (США) влітку 2020 р.
[<https://newdaynews.ru/inworld/702344.html>]
Fig. 4 – A unique phenomenon (red day) caused by a large-scale forest fire in California (USA) in summer 2020
[Available from <https://newdaynews.ru/inworld/702344.html>]

Штат Аляска. Спостерігалось більше 107 великих пожеж на території 0,7 млн га [21].

Для порівняння додамо, що площа лісових пожеж у Канаді в серпні 2020 р. була близько 2 тис. га. Евакуйовано 3,8 тис. чоловік з 4 тис. жителів [22]. Загальна площа лісових масивів, що згоріли в США в 2020 р. склала близько 2,7 млн га.

Така сумна статистика характеризує стан наслідків лісових пожеж у західній півкулі. Далі наведемо стан наслідків пожеж у Європі.

Лісові пожежі в Іспанії. Пожежі в іспанській провінції Андалусія почалися 27 серпня 2020 р. і тривали не менше трьох тижнів (рис. 5). Площа, пройдена вогнем, була близько до 10 тис. га. Було евакуйовано 3100 осіб. Пожежі гасило 500 осіб, залучались до гасіння 16 вертольотів, 8 літаків і армійський персонал [23]. Нанесений збиток склав близько 500 млн доларів США.

Лісові пожежі у Греції. Пожежа у Греції 19–20 липня 2020 р. розпочалася з 47 осередків. Пожежа змінної інтенсивності тривала до 5 вересня 2020 р. (рис. 6). Загинуло 87 осіб. Пожежу гасили 391 пожежний, 154 одиниці техніки, 12 літаків, 4 вертольоти і добровольці [24]. Лісові пожежі у Греції біля Афін відзначалися у серпні – вересні 2020 р. Щодооби реєструвалося від 40 до 60 осередків лісових пожеж. Площа, пройдена вогнем, склала близько 1 тис. га. Пожежу



Рис. 5 – Масштабна лісова пожежа в Іспанії влітку 2020 р.

[<https://earthcentre.earth/climatechange.php>]

Fig. 5 – A large-scale forest fire in Spain in summer 2020

[Available from

<https://earthcentre.earth/climatechange.php>]



Рис. 6 – Масштабна лісова пожежа в Греції влітку 2020 р.

[<https://www.euointegration.com.ua/rus/news/2021/05/20/7123382/>]

Fig. 6 – A large-scale forest fire in Greece in summer 2020

[Available from

<https://www.euointegration.com.ua/rus/news/2021/05/20/7123382/>]

гасили 180 пожежників, 56 одиниць техніки, в тому числі 6 літаків і 8 вертольотів [24]. Суттєво менша пожежа (80 га) мала місце на території республіки Афон 13 червня 2020 р. Збиток, нанесений пожежами, склав близько 50 млн доларів США.

Лісові пожежі у Франції. Пожежа спалахнула 5 серпня 2020 р. на півдні Франції (рис. 7). Згоріло понад 1500 га лісу. Евакуйовано 4 тис. чоловік. В гасінні пожежі взяли участь 2 тис. рятувальників. Постраждали 15 пожежних [25]. Нанесений збиток склав близько 75 млн доларів США.

Лісові пожежі в Україні. Пожежі в Київській і Житомирській областях мали місце в

квітні – травні 2020 р. Приблизно за місяць пожежа пройшла територію в 2,3 тис. га.

Вогняна стихія в Харківській області спостерігалась з 2 по 7 вересня 2020 р. Вогонь пошкодив близько 500 га лісу. Перші пожежі в Луганській області розпочалися також 2 вересня 2020 р.

Найсильніші пожежі реєструвалися в Луганській області з 20 вересня по 4 жовтня 2020 р. (рис. 8). Від пожеж суттєво постраждало 32 населених пункти, згоріло 300 будинків, загинуло 11 осіб, з опіками за медичною допомогою звернулося 19 осіб. Відселили 150 людей. У гасінні пожежі брали участь 1154



Рис. 7 – Масштабна лісова пожежа на півдні Франції влітку 2020 р.

[<https://www.bbc.com/russian/news-40725728>]

Fig. 7 – A large-scale forest fire in the south of France in summer 2020

[<https://www.bbc.com/russian/news-40725728>]



Рис. 8 – Масштабна лісова пожежа в Луганській області (Україна) влітку 2020 р.

[<https://donpress.com/news/07-07-2020-vtorye-sutki-polyhaet-masshtabnyy-lesnoy-pozhar-v-luganskoj-oblasti>]

Fig. 8 – A large-scale forest fire in Luhansk region (Ukraine) in summer 2020

[<https://donpress.com/news/07-07-2020-vtorye-sutki-polyhaet-masshtabnyy-lesnoy-pozhar-v-luganskoj-oblasti>]

людини, 294 одиниці техніки, 3 пожежних літаки, вертоліт і пожежний потяг [26].

Нанесена пожежами в Україні шкода склала близько 1 млрд доларів США.

Результати аналізу екологічних наслідків лісових пожеж

Результати оцінки основних параметрів, що характеризують екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж, наведені в табл. 3. З табл. 3 видно, що маса згорілих лісових матеріалів була близько 3,5 Гт, маса викинутого в атмосферу диму була не менше 140 Мт, що майже в 100 тис. разів перевищило вміст диму над цими територіями в нормальних умовах. Маса емітованого CO₂ була близько 7,8 Гт, що більше, ніж на порядок перевищило його вміст у нормальних умовах.

Табл. 3 свідчить про те, що найбільш значимі екологічні наслідки горіння лісових масивів у 2020 р. мали місце в Російській Федерації. В США вони були приблизно в чотири рази меншими. Екологічні наслідки горіння лісних масивів у Іспанії й Україні були значно меншими.

За розрахунками маса інжектваного газу вуглекислого газу склала близько 350 Мт, що в тисячі разів перевищило його масу в нормальних умовах. Маса викинутої сажі перевищила 10 Мт, а це майже в 100 тис. разів більше маси С у нормальних умовах. Маса

Великомасштабні лісові пожежі в Україні навесні–влітку–восени 2020 р. більш детально описані авторами в роботі [6].

інжектванних вуглеводнів була близько 140 Мт, що на два порядки перевищило їх масу в нормальних умовах.

Маса інжектванних в атмосферу цілої низки хімічних елементів, утворених великомасштабними лісовими пожежами, наведена в табл. 4. Із цієї таблиці можна бачити, що найбільша емісія була для азоту, кальцію та калію. Важливо, що найбільші викиди мали місце під час великомасштабних лісових пожеж у Російській Федерації, дещо менше – у США. Викиди в Іспанії й Україні були в сотні-тисячі разів менші.

Енергія акустичного випромінювання склала близько 100 ПДж, що майже в 1000 разів перевищило його енергію в нормальних умовах. При цьому густина потоку акустичного випромінювання 0.1–4 Вт/м² при нормі 10⁻³ Вт/м². Як відомо, енергія акустичного випромінювання містить у собі 1–10% енергії інфразвукового випромінювання і склала близько 100 ПДж, що майже у тисячу разів перевищило її енергію в нормальних умовах [14].

Таблиця 3

Параметри екологічних наслідків горіння лісових масивів у Північній півкулі в 2020 р.

Table 3

Parameters of ecological consequences from forest fires in the Northern Hemisphere during 2020

Параметр	Росія	США	Іспанія	Україна	Фонові значення над даною територією	Відносне збільшення
Площа пожеж, га	12 млн	2.7 млн	10 тис.	23 тис.	–	–
Маса згорілих матеріалів, Мт	2400	1080	3	2.3	–	–
Маса диму, Мт	96	43.2	0.12	9.2·10 ⁻²	1.5·10 ⁻³	9.3·10 ⁴
Маса CO ₂ , Мт	5400	2430	6.75	5.2	676	11.6
Маса CO, Мт	240	108	0.3	2·10 ⁻³	0.15	2.3·10 ³
Маса С, кт	7200	3240	9	6.9	0.15	7·10 ⁴
Маса вуглеводнів, Мт	96	43.2	0.12	0.1	1.47	95
Енерговиділення, ПДж	2.4·10 ⁴	1.1·10 ⁴	30	23	–	–
Середня тривалість, діб	60	30	30	10	–	–
Середня потужність, ТВт	4	3.6	0.01	2.3·10 ⁻²	–	–
Енергія акустичного випромінювання, ПДж	72	33	9·10 ⁻²	6.9·10 ⁻²	0.117	900
Потужність акустичного випромінювання, ПВт	12	11.1	0.03	6.9·10 ⁻²	3.9·10 ⁻²	590

Таблиця 4

Маса інжектованих хімічних речовин при лісових пожежах

Table 4

Mass of chemicals injected during forest fires

Хімічний елемент	Країна				Сумарна інжекція
	Росія	США	Іспанія	Україна	
N, Мг	24–240	11–108	0,03–0,3	0,02–0,2	35–348
K, т	24–144	54–324	0,2–1,2	$(4,6–27,6) \cdot 10^{-2}$	80–470
Ca, т	48–96	108–216	0,4–0,8	$(9,2–18,4) \cdot 10^{-2}$	160–320
Fe, т	7,2–44,4	16,2–100	0,06–0,37	$(1,4–8,5) \cdot 10^{-2}$	24–144
Zn, т	0,8–10,4	1,9–22,4	$(0,7–8,7) \cdot 10^{-2}$	$(1,6–20) \cdot 10^{-3}$	2,7–33,9
Cr, т	1,6–7,4	3,8–17,6	$(1,4–6,5) \cdot 10^{-2}$	$(3,2–14,9) \cdot 10^{-3}$	5,4–25
Br, т	0,8–2,8	1,9–6,2	$(0,7–2,3) \cdot 10^{-2}$	$(1,6–5,3) \cdot 10^{-3}$	2,7–8,9
Mn, т	0,1–2,9	0,27–7,83	$(1,0–29,0) \cdot 10^{-3}$	$(2,3–66,7) \cdot 10^{-4}$	0,4–10,7
Pb, т	0,4–0,8	1,08–2,16	$(0,4–0,8) \cdot 10^{-2}$	$(9,2–18,4) \cdot 10^{-3}$	1,6–3
Rb, т	0,2–0,6	0,54–1,35	$(0,2–0,5) \cdot 10^{-2}$	$(4,6–11,5) \cdot 10^{-4}$	0,8–1,95
Sr, т	0,1–0,6	0,27–1,35	$(0,1–0,5) \cdot 10^{-2}$	$(2,3–11,5) \cdot 10^{-4}$	0,4–2
Se, т	0,1–0,4	0,27–0,81	$(1,0–3,0) \cdot 10^{-3}$	$(2,3–6,9) \cdot 10^{-4}$	0,4–1,2

Таблиця 5

Густина потоку тепла від пожежі

Table 5

Thermal flux density from fire

$\Delta T, K$	Надлишок температури при пожежі									
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$\Pi_t, кВт/м^2$	1	3,1	6,9	13	23	37	56	83	120	160

Густина потоку теплового випромінювання Π_t для різних значень надлишку температури $\Delta T = T - T_0$ наведена в табл. 5. В залежності від надлишку температури над пожежею значення густини потоку теплового змінюються на чотири порядки. За густини

потоку теплового випромінювання, більшого за $(0,1–1) \cdot 10^5$ Вт/м², виникає займання лісових масивів, що призводить до значного розширення площі лісових пожеж. В значній мірі цьому сприяє сильний вітер.

Висновки

Теоретичні розрахунки та математичне моделювання показали, що катастрофічні пожежі у Північній півкулі у 2020 р. викликали рекордні екологічні наслідки. Найбільше вигоріло лісів у Росії та США. Постраждали екогеосистеми на площі близько 15 млн га, що приблизно у 3300 разів менше площі поверхні Землі. У стільки ж разів через процеси переносу зменшилося відносне перевищення мас емітованих продуктів горіння та потужності випромінювання. Безповоротно втрачено понад 3,5 Гт деревини. Економічний збиток склав біля 750 млрд доларів США. Загинули та були травмовані десятки людей. Матеріальний і моральний збиток завдано багатьом тисячам людей.

Встановлено, що маса диму і сажі у 100 тис. разів перевищила їх масу у нормальних умовах. Дуже значними були викиди CO, CO₂, вуглеводнів, а також енергій теплового і акустичного випромінювання. Та їх маса диму та сажі в усій земній атмосфері збільшилася приблизно у 30 разів, а маса CO – приблизно подвоїлася у порівнянні з нормальним станом. Звісно, завислі частинки диму та сажі, що знаходяться в тропосфері, поступово вимиваються опадами. Частинки, що потрапили до стратосфери, існують там місяцями і навіть роками. В атмосферу викинуто близько 140 Мт диму, що майже в 100 тис. разів перевищує його вміст у атмосфері над згорілими лісами в нормальних умовах. В атмосферу емітовано понад 10 Мт сажі,

що в 70 тис. разів перевищує її вміст у нормальних умовах. Маса інжектваного газу CO складала близько 350 Мт, що в 2,3 тис. разів перевищує його вміст у нормальних умовах. Маса викинутих в атмосферу вуглеводнів складала близько 140 Мт, що приблизно в 100 разів перевищило їх масу в нормальних умовах. В атмосферу додатково емітовано близько 7,8 Гт газу CO₂, що на порядок перевищило його вміст у нормальних умовах.

У атмосферу викинуто сотні мегатонн атомарного азоту, сотні тон калію та кальцію, а також від одиниць до десятків тон таких хімічних елементів, як Fe, Zn, Cr, Br, Mn, Pb, Rb, Sr і Se.

Від теплового випромінювання страждали та гинули люди. Густина потоку теплового випромінювання досягала 56–160 кВт/м², що могло викликати посилення пожеж.

Енергія акустичного випромінювання містить у собі 1–10% енергії інфрачервоного випромінювання і складала близько 100 ПДж,

що майже у тисячу разів перевищило її енергію в нормальних умовах. Звукові хвилі затухають на порівняно невеликих відстанях, на відміну від них інфрачервові хвилі поширюються в глобальних масштабах і негативно впливають на біосферу та людей, зокрема. Енергія слабкозатухаючого інфрачервоного випромінювання складала 1–10 ПДж і це суттєво може впливати на екогеосистеми. Також воно не сприймається вухами людини, але впливає на всі його органи та загальний психо-емоційний стан, викликаючи страх, паніку і навіть психічні розлади.

Важливо, що навіть після розподілення продуктів горіння лісів над усією землею кулею їх концентрація перевищувала концентрацію у нормальних умовах. І у першу чергу це відноситься до диму, сажі та чадного газу.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що екологічні наслідки горіння великих масивів лісів у 2020 р. для планети стали рекордними.

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. Титенко А. В., Черногор Л. Л. Экологические последствия крупномасштабных лесных пожаров в Украине весной–осенью 2020 г. Л. Охорона довкілля: зб. наук. статей XVI Всеукраїнських наукових Талійських читань. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С.164–166.
2. Черногор Л. Л. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні у 2020 р. Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: матеріали VIII Міжнародної наукової конференції молодих вчених. Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. С. 33–35.
3. Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Титенко 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>
4. Boer M. M., Resco de Dios V., Bradstock R.A. Unprecedented burn area of Australian mega forest fires. *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 171–172. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0716-1>
5. 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. P. 21–30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0621-0>
6. 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. P. 312–322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.041>
7. Будько М., Голицын С., Израэль Ю. Глобальные климатические катастрофы: Влияние ядерного конфликта на климат. М.: Гидрометеиздат, 1986. 159 с.
8. Климатические и биологические последствия ядерной войны. Отв. ред. Е. Велихов. М.: Наука, 1987. 288 с.
9. Питток Б., Акерман Т., Крутцен П. Последствия ядерной войны. Физические и атмосферные эффекты. пер. с англ. М.: Мир, 1988. 392 с.
10. Харуэлл М., Хатчинсон Т., Кроппер У. Последствия ядерной войны. Воздействие на экологию и сельское хозяйство. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 551 с.

11. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
12. Иншаков Ю. З. Моделирование процессов экологического воздействия пожаров на окружающую среду: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 03.00.16. Воронеж: Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, 2003. 128 с.
13. Черногор Л. Физика и экология катастроф: монография. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
14. Черногор Л. Космос, Земля, человек: актуальные проблемы. Х.: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2017. 384 с.
15. Иванов А. В. Газо-аэрозольные эмиссии при лесных низовых пожарах. Дисс. на соискание ученой степени кандидата биологических наук. Красноярск: Институт леса им. В. Н. Сухачева СО РАН. 2003. 154 с.
16. Лесные пожары в России 28 июня 2020 года. (2021). URL: <http://www.forestforum.ru/viewtopic.php?f=24&t=24615>
17. В России горят более 990 тысяч гектаров леса. (2021). URL: <https://www.dw.com/ru/в-россии-горят-более-990-тысяч-гектаров-леса/a-53883974>
18. От лесных пожаров небо Калифорнии стало оранжевым. (2021). URL: <https://www.dw.com/ru/от-лесных-пожаров-небо-калифорнии-стало-оранжевым-a-54889865/a-54889865>
19. Американцы бегут от пожаров: в Орегоне эвакуировано полмиллиона человек. (2021). URL: <https://www.bbc.com/russian/news-54096007>
20. В США бушуют лесные пожары. (2021). URL: <https://ru.euronews.com/2020/09/12/usa-west-coast-massive-fires>
21. Лесные пожары в Арктике. Каковы их истинные масштабы? (2021). URL: <https://www.bbc.com/russian/features-49241145>
22. "У людей было 15 минут на сборы". В Канаде из-за небывалой жары сгорел поселок. (2021). URL: <https://www.bbc.com/russian/news-57695158>
23. Лесной пожар в испанской Андалусии захватил новые территории. (2021). URL: <https://rg.ru/2020/08/31/lesnoj-pozhar-v-ispanskoj-andalusii-zahvatil-novye-territorii.html>
24. В Греции бушуют лесные пожары вокруг Афин. (2021). URL: <https://www.eurointegration.com.ua/rus/news/2020/09/9/7114176/>
25. Во Франции бушуют лесные пожары: эвакуированы 10 тысяч человек. (2021). URL: <https://www.bbc.com/russian/news-40725728>
26. На пожаре в Луганской области погиб человек: горит 945 га. (2021). URL: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2020/09/3/7265071/>

Стаття поступила до редакції 30.06.2021

Стаття рекомендована до друку 12.10.2021

L. F. CHERNOGOR, DSc (Physics and Mathematics), Professor

Head of the Department of Space Radio Physics

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

V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 4, 61022, Kharkiv, Ukraine

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

Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education

alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

G. V. TITENKO¹, Ph.D. (Geography), Associate Professor,

Head of Karazin Institute of Environmental Sciences

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

L. L. CHORNOHOR¹

Student of Karazin Institute of Environmental Sciences

L.L.Chornohor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

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

ECOLOGICAL CONSEQUENCES FROM FOREST BURNING IN THE NORTHERN HEMISPHERE IN 2020: RESULTS OF MODELING AND QUANTITATIVE CALCULATIONS

Purpose is quantitative estimation of the mass of emissions of combustion products, chemical elements, the energy and power of acoustic and thermal radiation caused by the forests large tracts burning in the Northern Hemisphere.

Methods. Analytical review of investigation problem, theoretical and computational, numerical modeling, system analysis.

Results. It was found that large-scale fires in the Northern Hemisphere in 2020 had catastrophic ecological consequences. The greatest contribution was made by the burning of forests in Russia and the USA. Ecosystems were affected on an area of about 15 million hectares. About 3,5 Gt of wood was irretrievably lost. About 140 Mt of smoke and more than 10 Mt of soot were emitted into the atmosphere. The mass of the injected CO gas was about 350 Mt. The mass of hydrocarbons emitted into the atmosphere was about 140 Mt. About 7,8 Gt of CO₂ gas was additionally emitted into the atmosphere. Hundreds of megatons of atomic nitrogen, hundreds of tons of potassium and calcium, as well as from units to tens of tons of such chemical elements as Fe, Zn, Cr, Br, Mn, Pb, Rb, Sr and Se have been emitted into the atmosphere. The energy of acoustic radiation was about 100 PJ, which is almost a thousand times higher than its energy under normal conditions. The energy of weakly damped infrasonic radiation was 1–10 PJ. The thermal radiation flux density reached 56–160 kW/m². Even after the distribution of forest combustion products around the globe, their concentration exceeded the concentration under normal conditions. This primarily applies to smoke, soot and carbon monoxide. The economic damage amounted to about 750 billion US Dollars. Dozens of people died and were injured. Material and moral damage has been caused to many thousands of people. Material and moral damage caused to many thousands of people.

Conclusions. The ecological consequences of the forests large tracts burning of Northern Hemisphere in 2020 for the planet became a kind of record.

KEYWORDS: ecological consequences, area of fire, combustible material, energy of fire, release of combustion products

References

1. Titenko, A. V. & Chornohor, L. L. (2020). Environmental consequences of large-scale forest fires in Ukraine in Spring–Autumn 2020. Proceedings of the XVI Ukrainian Science Taliev Lectures: *Environmental protection*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University. (In Russian).
2. Chornohor, L. L. (2020). Environmental consequences of large-scale forest fires in Ukraine in 2020. Proceeding of the VIII Intern. Scientific Conf. of Young Scientists: Ecology, neoecology, environmental protection and sustainable using of natural resources. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 33–35 (In Ukrainian).
3. 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).
4. 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>
5. 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>

6. 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>
7. Budyko, M., Golitsyn, S. & Izrael, Yu. (1986). Global climatic catastrophes: the impact of nuclear conflict on the climate. Moscow: Gidrometeoizdat (In Russian).
8. Velikhov E. (Ed.). (1987). Climatic and biological consequences of nuclear war. Moscow: Nauka. (In Russian).
9. 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).
10. Harwell, M. A., Hutchinson, T. C., Cropper Jr., W. P., Harwell, C. C. & Grover, H. D. (1985). SCOPE 28: Environmental consequences of nuclear war. Volume II. Ecological and agricultural effects. United States: Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
11. Kuznetsov G. V. & Baranovskii N. V. (2009). Forecast of forest fires appearance and their environmental consequences. Novosibirsk: Publ. SB RAS.
12. Inshakov Y. Z. (2003). Modelling processes ecological influence of fires on the environment. Candidate's Thesis. Voronezh: Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering, (in Russian)
13. Chernogor, L. F. (2012). Physics and Ecology of Disasters. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
14. Chernogor, L. F. (2017). Space, the Earth, Mankind: Contemporary Challenges. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. (in Russian).
15. Ivanov A. V. (2003). Gas-aerosol emissions during forest ground fires. Candidate's Thesis. Krasnoyarsk: Sukahev Institute of Forest SB RAS. (in Russian).
16. Forest fires in Russia on June 28, 2020. (2021). Retrieved from <http://www.forestforum.ru/viewtopic.php?f=24&t=24615>
17. More than 990 thousand hectares of forest burn in Russia. (2021). Retrieved from <https://www.dw.com/ru/в-россии-горят-более-990-тысяч-гектаров-леса/a-53883974>
18. California sky turned orange from forest fires. (2021). Retrieved from <https://www.dw.com/ru/ot-lesnyh-pozharov-nebo-kalifornii-stalo-oranzhevym-a-54889865/a-54889865>
19. Americans fleeing from the fire: half a million people evacuated in Oregon. (2021). Retrieved from <https://www.bbc.com/russian/news-54096007>
20. Forest fires are raging in USA. (2021). Retrieved from <https://ru.euronews.com/2020/09/12/usa-west-coast-massive-fires>
21. Forest fires in Arctic. What is their true scale? (2021). Retrieved from <https://www.bbc.com/russian/features-49241145>
22. "People had 15 minutes to get ready." In Canada, due to unprecedented heat, a village burned down. (2021). Retrieved from <https://www.bbc.com/russian/news-57695158>
23. Forest fire in Spanish Andalusia captured new territories. (2021). Retrieved from <https://rg.ru/2020/08/31/le-snoj-pozhar-v-ispanskoj-andalusii-zahvatil-novye-territorii.html>
24. Forest fires rage in Greece around Athens. (2021). Retrieved from <https://www.eurointegration.com.ua/rus/news/2020/09/9/7114176/>
25. Forest fires rage in France: 10 thousand people evacuated. (2021). Retrieved from <https://www.bbc.com/russian/news-40725728>
26. A man died in a fire in the Luhansk region: 945 ha are on fire. (2021). Retrieved from <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2020/09/3/7265071/>

The article was received by the editors 30.06.2021
The article is recommended for printing 12.10.2021

Л. Ф. ЧОРНОГОР, д-р физ.-мат. наук, проф.,
заведующий кафедры космической радиофизики
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина,
площадь Свободы, 6, г. Харьков, Украина, 61022

А. Н. НЕКОС¹, д-р геогр. наук, проф.,
заведующая кафедры экологической безопасности и экологического образования
alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

А. В. ТИТЕНКО¹, канд. геогр. наук, доц.,
директор учебно-научного института экологии
titenko@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

Л. Л. ЧОРНОГОР¹,
студент учебно-научного института экологии
L.L.Chornohor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

¹*Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, площадь Свободы, 6, г. Харьков, Украина, 61022*

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ В 2020 г.: РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И КОЛИЧЕСТВЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Цель. Количественная оценка массы выбросов продуктов горения, химических элементов, энергии и мощности акустического и теплового излучений, вызванных горением больших лесных массивов в Северном полушарии.

Методы. Аналитический обзор проблемы исследований, теоретико-расчетные, численное моделирование, системный анализ.

Результаты. Установлено, что крупномасштабные пожары в Северном полушарии в 2020 г. имели катастрофические экологические последствия. Наибольший вклад внесло горение лесов в России и США. Пострадали экосистемы на площади около 15 млн га. Безвозвратно потеряно около 3,5 Гт древесины. В атмосферу выброшено около 140 Мт дыма, более 10 Мт сажи. Масса инжесктированного газа СО составила около 350 Мт. Масса выброшенных в атмосферу углеводов составила около 140 Мт. В атмосферу дополнительно эмитировано около 7,8 Гт газа СО₂. В атмосферу выброшено сотни мегатонн атомарного азота, сотни тонн калия и кальция, а также от единиц до десятков тонн таких химических элементов, как Fe, Zn, Cr, Br, Mn, Pb, Rb, Sr и Se. Энергия акустического излучения составила около 100 ПДж, что почти в тысячу раз превысило ее энергию в нормальных условиях. Энергия слабозатухающего инфразвукового излучения составила 1–10 ПДж. Плотность потока теплового излучения достигала 56–160 кВт/м². Даже после распределения продуктов горения лесов по всему земному шару их концентрация превышала концентрацию в нормальных условиях. В первую очередь это относится к дыму, саже и угарному газу. Экономический ущерб составил около 750 млрд долларов США. Погибли и были травмированы десятки людей. Материальный и моральный ущерб нанесен многим тысячам людей.

Выводы. Экологические последствия горения больших массивов лесов в 2020 г. для планеты стали своеобразным рекордом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологические последствия, площадь пожара, горючий материал, энергетика пожара, выброс продуктов горения

Статья поступила в редакцию 30.06.2021

Статью рекомендовано к печати 12.10.2021