

ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-06>

УДК (UDC): 504.055

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

завідувач кафедри космічної радіофізики

e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

А. Н. НЕКОС¹, д-р географ. наук, проф.,

завідувачка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти

e-mail: alnekos999@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

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

директор навчально-наукового інституту екології

e-mail: titenko@karazin.ua

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

Л. Л. ЧОРНОГОР¹,

студент навчально-наукового інституту екології

e-mail: L.L.Chornohor@gmail.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-8850>

¹Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

майдан Свободи 6, 61022, м. Харків, Україна

ВПЛИВ ЯВИЩА ЕЛЬ-НІНЬО НА ВИНИКНЕННЯ МАСШТАБНИХ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ ТА ЇХНІ ЕКОЛОГІЧНІ НАСЛІДКИ

Частота та інтенсивність лісових пожеж рік від року зростає. Це пов'язано із глобальним потеплінням, пов'язаним як з природними, так і з антропогенними явищами і процесами. Існує й інший механізм глобального впливу на кліматичні зміни, аномально високу літню температуру, силу та частоту посухи, інтенсивність і частоту лісових пожеж і їхніх наслідків. Він пов'язаний з унікальним, циклічним, природним явищем Ель-Ніньйо. Не можна виключати можливість впливу цього явища на інтенсивність великомасштабних лісових пожеж та їхніх екологічних наслідків, відповідно аналізу цих процесів та кількісної їх оцінки. Є підстави вважати, що явище може впливати на інтенсивність і частоту лісових пожеж у країнах, що знаходяться неподалік від нього. Такою країною є, зокрема, Чилі, де щорічно спостерігаються інтенсивні лісові пожежі. Їхня інтенсивність порівнюється з інтенсивністю рекордних пожеж в Україні у 2020 р.

Мета. Порівняльна оцінка екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж, стимульованих природними та антропогенними впливами (на прикладі України та Чилі у 2014–2024 рр.)

Методи. Системний аналіз низки супроводжуваних процесів, математичне моделювання та теоретичні розрахунки. Розроблено методику оцінки екологічних наслідків пожеж і вигорання будівель у населених пунктах.

Результати. Площі пожеж у 2017 та 2023 рр. сягали 0,5 млн га в Чилі. Викиди диму наближались до 10 Мт, що у сто тисяч разів перевищувало норму. Близько 0,5 Гт були викиди вуглекислоти. Вони у 200 разів перевищили фонове значення на території пожеж. Емісія сажі, чадного газу та вуглеводнів перевищила норму відповідно у 120 тис., 4 тис. і 160 разів. Викиди мікрочастинок РМ_{2,5} та поліароматичних вуглеводнів перевищували норму відповідно в 40 разів та більше ніж в мільйон разів. Емісія оксидів азоту та сірки перевищували норму відповідно у 3 тис. та 400–800 разів. Енергія горіння перевищувала 2 тис. ПДж, а середня потужність горіння – 1 ТВт. Енергія акустичного випромінювання, що сягала 7 ПДж, перевищувала фонове значення більше ніж в 1000 разів. В той же час потужність цього випромінювання перевищувала норму більше ніж у сто тисяч разів і складала близько 700 ГВт. Найбільшими були викиди N, що сягали 1–10 Мт. Значною була емісія K, Ca, Fe, Zn, Sr та Br. На порядки меншими були викиди інших хімічних елементів. Побудова математичних моделей надала можливість обчислити концентрацію та масу емітованих шкідливих речовин при горінні населених пунктів, спровокованому лісовими пожежами. Вперше встановлено, що викиди речовин при цьому можуть бути значними. Вперше обґрунтовано необхідність врахування впливу, обчислено масу та концентрацію мікронних частинок диму та поліароматичних вуглеводнів, що призводять відповідно до захворювання дихальних шляхів, серцево судинної системи та онкологічних захворювань жителів всієї країни та за її межами. Оцінено викиди оксидів азоту та сірки, що стимулюють появу кислотних дощів. Порівняльний аналіз характеристик і наслідків пожеж лісових масивів показав, що у Чилі у 2017 та 2023 рр. були значно (майже -

у 20 разів) та у лютому 2024 р. масштабнішими, ніж рекордні за своїми показниками і наслідками пожежі в Україні у 2020 р.

Висновки. Математичне моделювання та обчислення показали, що екологічні наслідки горіння великих лісових масивів і забудов у Чилі в 2023–2024 рр. були катастрофічними. Вони супроводжувалися активізацією явища Ель-Ніньйо. Не менш масштабними були екологічні наслідки лісових пожеж у Чилі в 2017 р., викликані найбільшим спекотним на той час літом. Масштаби пожеж у Чилі та їхні наслідки в багатьох разів перевищували відповідні показники рекордних пожеж в Україні в 2020 р.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лісова пожежа, горіння будівель, енергетика пожежі, викиди продуктів горіння, енергетика акустичного випромінювання, екологічні наслідки

Як цитувати: Черногор Л. Ф., Некос А. Н., Тітенко Г. В., Черногор Л. Л. Вплив явища Ель-Ніньйо на виникнення масштабних лісових пожеж та їхні екологічні наслідки. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразін. Серія «Екологія»*. 2024. Вип. 30. С. 76–90. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-06>

In cites: Chernogor, L. F., Nekos, A. N., Titenko, G. V., & Chornohor, L. L. (2024). The influence of the El Niño phenomenon on appearance of large-scale forest fires and their ecological consequences. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (30), 76 - 90. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-30-06> (in Ukrainian)

Вступ

У 1950-ті роки в США з'явилася нова наука, що отримала назву лісова пірологія. Ця наука закликає вивчати природу лісових пожеж, їхній вплив на екосистеми, спричинені втрати, заходи щодо попередження та боротьби з лісовими пожежами тощо. Великомасштабні лісові пожежі – катастрофічне явище на планеті [1–3]. Щороку такі пожежі знищують від 40 до 200 млн га з 4 млрд га лісових масивів і 8,8–44 км³ деревини. Економічні збитки сягають від 40 до 200 млрд доларів США. Під час лісових пожеж щорічно на планеті гинуть сотні людей, велика кількість тварин, птахів та інша живність. Все це означає, що великомасштабні лісові пожежі мають значні екологічні, економічні та соціальні наслідки. Лісовим пожежам традиційно приділяється велика увага [4–17].

Важливо, що частота та інтенсивність лісових пожеж в останні десятиліття невпинно зростає. Так, згідно прогнозу ООН кількість великомасштабних пожеж, яких зараз в світі 200–350 тисяч щорічно, в 2030, 2050 та 2100 роках зростає на 14, 30 та 50% відповідно. Головна причина цієї сумної статистики – глобальне потепління [4]. Завдяки цьому має місце позитивний зворотній зв'язок між глобальним підвищенням температури та частотою і інтенсивністю пожеж. Крім глобального потепління, яке безпосередньо впливає на частоту та інтенсивність лісових пожеж, є й інші природні і антропогенні явища, які опосередковано впливають

на ці параметри великомасштабних лісових пожеж. Є вагомими підстави вважати, що до них належить і явище Ель-Ніньйо (Південна осциляція).

Ель-Ніньйо (ENSO) – це феноменальне, циклічне (з періодом від 2 до 7 років та тривалістю 9-12 місяців) природне явище, що характеризується аномальним потеплінням поверхневих вод у східній і центральній частинах Тихого океану, наслідком якого є зміна погодних умов на всій планеті. Ель-Ніньйо здатне провокувати екстремальні погодні процеси, а саме великомасштабні лісові пожежі, тропічні циклони (тайфуни), тривалі посухи, ливневі дощі та повені тощо. У різних регіонах світу це явище викликає різну зміну погодних умов. Підвищення температури поверхневого шару Тихого океану призводить до нагріву атмосфери, збільшуючи тепло, що утримується парниковими газами, які утворюються в результаті діяльності людини, зменшенню кількості опадів і посухи в одних регіонах планети та ливневі опади у інших. Все це призводить до загибелі океанічних організмів, зменшення біорізноманіття на суші та інших екологічних наслідків.

Явище Ель-Ніньйо найбільш суттєво впливає на прилеглі до східного узбережжя Тихого океану території Південної Америки, зокрема, Чилі. Явище викликає катастрофічні лісові пожежі та значні екологічні наслідки. В 2023-2024 рр. воно активізувалося

знову. У цей же час спостерігалось збільшення частоти та інтенсивності лісових пожеж у Чилі. Їхню інтенсивність доцільно порівняти з інтенсивністю рекордних за масштабами пожеж в Україні в 2020 р.

Методи досліджень

Для кількісного дослідження екологічних наслідків горіння великих лісових масивів в Україні та Чилі впродовж 2014–2024 рр. використовувалися наступні методи: аналітичний огляд проблеми дослідження, системний аналіз низки супроводжуючих процесів, математичне моделювання та теоретичні розрахунки. У роботі моделювались: маса згорілих матеріалів, тепла енергія та середня потужність горіння, енергія та потужність акустичного випромінювання, викиди маси диму, вуглекислоти, чадного газу, сажі, вуглеводнів, мікрочастинок з розміром менше 2,5 мкм (PM 2,5), поліароматичних вуглеводнів (ПАВ), газів NO_x та SO_x і цілої низки хімічних елементів (N, K, Ca, Fe, Zn, Cr, Br, Mn, Pb, Rb, Sr, Se). Окремо обчислені маси шкідливих речовин при пожежі у житлових будівлях, яка перекинулася на населені пункти під час інтенсивних лісових пожеж на території Чилі.

Методика моделювання екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж описана у роботах авторів [1–3]. Вихідними параметрами при моделюванні та кількісних підрахунках були: площа пожежі S , питома маса горючих матеріалів \tilde{m} , коефіцієнти перетворення маси горючих матеріалів у маси певних продуктів горіння. При обчисленнях використовувалися такі значення коефіцієнтів: 0,005–0,013 для PM 2,5; 0,00002 для ПАВ; 0,003 для NO_x та 0,0005–0,001 для SO_x відповідно. Для цих же речовин фонові значення, отримані з різних джерел, склали 10 мкг/м³; 0,5 нг/м³; 40 мкг/м³ і 50 мкг/м³ відповідно. Товщина атмосферного шару з цими речовинами приймалася рівною 1 км.

Енергетика акустичного випромінювання пожеж оцінювалася наступним чином. Енергія акустичного випромінювання E_a пропорційна тепловій енергії E , що виділяється при горінні [1–3]:

$$E_a = \eta_a E .$$

Тут $\eta_a = 3 \cdot 10^{-3}$. Оскільки

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

Метою є порівняльна оцінка екологічних наслідків великомасштабних лісових пожеж, стимульованих природними та антропогенними впливами (на прикладі України та Чилі в 2014–2024 рр.).

де $q \approx 10^7$ Дж/кг – питома енергія горіння, S – сумарна площа пожежі, то густина потоку енергії

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

Для густини потоку акустичної енергії маємо:

$$\Pi_a = \eta_a \Pi = \eta_a q\tilde{m} .$$

Густина потоку потужності акустичного випромінювання

$$\Pi_{Pa} = \frac{\Pi_a}{\tau} ,$$

де τ – характерний час вигорання, який складає 10^3 – 10^4 с. Для лісів у Чилі в середньому $\tilde{m} \approx 40$ кг/м², $\Pi_a \approx 1,2 \cdot 10^6$ Дж/м² і для $\tau \approx 10^4$ с маємо $\Pi_{Pa} \approx 120$ Вт/м². Для лісів України за $\tau \approx 3 \cdot 10^3$ с отримуємо $\Pi_{Pa} \approx 100$ Вт/м². Повна потужність акустичного випромінювання

$$P_a = \Pi_{Pa} S .$$

Під час горіння лісів зазвичай страждають житлові будівлі, що знаходяться на суміжних з лісовими масивами територіях, та виникають додаткові екологічні наслідки. Авторами розроблено методику оцінки екологічних наслідків пожеж і вигорання будівель у населених пунктах. Коротко її сутність полягає у наступному.

Нехай площа одного поверху в j -тому будинку S_{1j} . Тоді загальна площа в цьому будинку з n_j поверхами

$$S_j = S_{1j} n_j .$$

Сумарна площа N будинків, охоплених пожежею,

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N S_j N_j = \sum_{j=1}^N S_{1j} n_j N_j ,$$

де N_j – число будинків з площею S_j .

Якщо висота одного поверху h_j , то об'єм приміщення, охопленого пожежею,

$$V_j = S_j h_j .$$

Сумарний об'єм

$$V_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N S_j h_j .$$

Маса шкідливих речовин з питомою концентрацією c_k

$$m_k = c_k S_{\Sigma} V_{\Sigma}.$$

Для оцінки мінімальної площі, ураженої пожежами, вважаємо, що кількість поверхів у будівлях $n_j = 1$. Тоді $S_j = S_{1j}$,

$$S_{\Sigma} = \sum_{j=1}^N S_{1j} N_j.$$

Якщо всі S_{1j} однакові, то $S_{\Sigma} = S_{1j} N$. За однакової висоти поверху $h_j = h$ маємо

$$V_{\Sigma} = S_{\Sigma} h = S_{1j} N h.$$

Тоді

$$m_k = c_k (S_{1j} N)^2 h.$$

Для оцінки максимальної площі, ураженої пожежами, вважаємо, що $\bar{S}_j = \bar{S}_{1j} \bar{n}_j$.

Тоді

$$\bar{S}_{\Sigma} = \bar{S}_j N = \bar{S}_{1j} \bar{n}_j N, \quad \bar{V}_{\Sigma} = \bar{S}_{\Sigma} h,$$

$$m_k = c_k (\bar{S}_{1j} \bar{n}_j N)^2 h.$$

При оцінці мінімальної площі розрахунки виконано для $n_j = 1$, $S_{1j} = 100 \text{ м}^2$, $h = 3 \text{ м}$. При оцінці максимальної площі вважалось, що $\bar{S}_{1j} = 300 \text{ м}^2$, $\bar{n}_j = 3$, $h = 3 \text{ м}$.

Відомо, що пожежі супроводжуються значними викидами диму та сажі. При цьому розмір частинок $2r_p$, де r_p – радіус частинки, змінюється від 10^{-4} до 10^{-7} м .

За диференціального закону розподілу за масами частинок m_p

$$dn = A \frac{dm_p}{m_p^{\alpha}},$$

де $\alpha \approx 2$, A – константа з розмірністю маси, що знаходиться з умови нормування, маємо для маси диму

$$m_s = \int_{m_{\min}}^{m_{\max}} m_p dn = A \ln \frac{m_{p \max}}{m_{p \min}} = 3A \ln \frac{r_{\max}}{r_{\min}} = 3AB.$$

Тут $B = \ln(r_{\max}/r_{\min}) = 3 \ln 10$. Тоді $A = m_s / 9 \ln 10$.

Маса частинок з розміром від $2,5 \cdot 10^{-6}$ до 10^{-7} м

$$\Delta m_s = 3A \ln 25 = (m_s \ln 25) / 3 \ln 10.$$

Звідси

$$\frac{\Delta m_s}{m_s} = \frac{\ln 25}{3 \ln 10} \approx 0.47.$$

Якщо $2r_{\min} = 10^{-6}$, а $2r_{\max} = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$, то відносна маса $\Delta m_s / m_s \approx 0,20$. Оскільки частка маси диму складає 0,04 від маси згорілих

матеріалів, то відносна маса мікрочастинок знаходиться у межах 0,008–0,019.

Чисельні спостереження показують, що мікрочастинок частіше розподілені за логнормальним законом. Під час лісових пожеж відносна маса знаходиться у межах 0,005–0,013. Ці значення дуже близькі до оцінених нами значень.

Частинки мікронного розміру за рахунок конвекції закидаються на висоти z_p в декілька кілометрів, потім вони повільно осідають на землю на глобальних відстанях. Швидкість осідання дається відомим співвідношенням:

$$v_p = \frac{2\rho_p g}{9\eta} r_p^2,$$

де ρ_p – густина речовини в мікрочастинці, g – прискорення вільного падіння, $\eta = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ Па/с}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості атмосферного газу. Тоді час осідання частинок

$$\tau_p = \frac{z_p}{v_p},$$

Під час обчислень приймалося, що $\rho_p \approx 2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ і $z_p \approx 1 \text{ км}$.

Ще у червні 2023 р. Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) ООН попередила про рекордні температури та хвилі екстремальної спеки, що пов'язані з приходом періодичного кліматичного явища Ель-Ніньйо. І справді літо 2023 р. стало найбільш спекотним за всю історію спостережень за варіаціями погоди на нашій планеті. Влітку температура повітря на 5°C перевищувала норму. Температура води в океані збільшилася від 1 до $7\text{--}9^{\circ}\text{C}$. Глобальна температура моря три місяці поспіль знаходилася на безпрецедентно високому рівні. Додаткова температура складала біля $2,5^{\circ}\text{C}$. ВМО прогнозувало, що явище відбуватиметься до кінця 2023 р. Як відомо, тривалість явища змінюється в широких межах: від 3 до 10 місяців, частіше за все воно близьке до 5–6 місяців. Як виявилось, максимальна потужність спостерігалася в січні – лютому 2024 р. Прогнозується, що літо 2024 р. може стати найбільш спекотним за всю історію спостережень саме через вплив явища Ель-Ніньйо. Наприклад, це явище спровокувало у 2016 р. на той час самі спекотні погодні умови, коли Ель-Ніньйо був найбільш активним, а температура поверхні океана підвищилася на близькі до рекордних

2,4°C. Оскільки це явище виникає в системі «океан-атмосфера», воно здатне підвищити температуру атмосфери на всій планеті на $\Delta T = 0,2^\circ\text{C}$. За площі земної поверхні $5 \cdot 10^8 \text{ км}^2$ та ефективної висоти атмосфери 10 км маємо додаткову теплову енергію атмосфери близько 10^{21} Дж (табл. 1). За тривалості додаткового нагріву атмосфери в п'ять місяців середня потужність складає 70 ТВт.

Обчислимо енергетичні характеристики Ель-Ніньйо. Енергія явища

$$E_{EN} = C_w \rho_w S h_{EN} \Delta T_{EN},$$

де $C_w \approx 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – питома теплоємність води, $\rho_w = 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ – густина води, S_w – площа нагрітої частини океану, h_{EN} – товщина океанічного шару води з підвищеною на ΔT температурою. За $S_w \approx 10^6 - 10^7 \text{ км}^2$, $h_{EN} = 200 \text{ м}$, $\Delta T = 5 \text{ К}$ маємо $E_{EN} = 4 \cdot 10^{21} - 4 \cdot 10^{22} \text{ Дж}$.

За тривалості в три місяці середня потужність Ель-Ніньйо складає $3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15} \text{ Вт}$. Обчислені авторами дані про параметри потужних природних процесів наведено у табл. 1.

Для порівняння у цій таблиці також наведено енергетичні характеристики інших природних процесів, описаних в [1-3].

Таблиця 1

Параметри потужних природних процесів

Table 1

Parameters of powerful natural processes

Явище	Площа, км ²	Енергія, Дж	Середня потужність, Вт	Тривалість процесу, с (добі)
Потік тепла із надр Землі	$5 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^{18}$	$3 \cdot 10^{13}$	10^5 (1)
Землетрус	$10^4 - 10^5$	$10^{18} - 10^{19}$	$10^{16} - 10^{17}$	10^2 (10^{-3})
Виверження вулкана	$10^{-4} - 10^{-2}$	$10^{19} - 10^{20}$	$10^{14} - 10^{16}$	$10^4 - 10^5$ (0,1-1)
Циклон	$10^6 - 10^7$	$10^{18} - 10^{19}$	$2 \cdot 10^{12} - 2 \cdot 10^{13}$	$5 \cdot 10^5$ (5)
Ураган (тайфун)	$10^5 - 10^6$	$10^{17} - 10^{18}$	$2 \cdot 10^{11} - 2 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^5$ (5)
Ель-Ніньйо	$10^6 - 10^7$	$4 \cdot 10^{21} - 4 \cdot 10^{22}$	$3 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{15}$	$1,3 \cdot 10^7$ (150)
Додатковий нагрів атмосфери	$5 \cdot 10^8$	10^{21}	$7 \cdot 10^{13}$	$1,4 \cdot 10^7$ (162)

Видно, що енергетика Ель-Ніньйо зазвичай перевищує енергетику інших потужних природних процесів. Все це обумовлює значний вплив Ель-Ніньйо на погодні умови у планетарному масштабі.

Важливо, що у Південній Америці це явище призводить до підвищення температури повітря, ймовірності виникнення посух та стимуляції великомасштабних лісових пожеж.

Результати первинного аналізу стану лісових пожеж на території Чилі

Країна Чилі у Південній Америці обрана для аналізу ситуацій, що склалися на її території з приводу величезних пожеж лісових масивів та прилеглих житлових масивів. Ця країна знаходиться поблизу частини Тихого океану, де спостерігається явище Ель-Ніньйо.

Масштабні пожежі в Чилі розпочалися 2 лютого 2024 р. Вже за декілька днів пожежа пройшла площу більше 45 тис. га. Як відомо, площа Чилі складає 756,9 тис. км², 80% якої займають гори. Переважають мішані ліси. Загальна площа лісів у Чилі складає 182 тис. км або 18 млн га, лісистість – 21%. Запаси деревини сягають 1,2 млрд м³ на площі 4,6 млн га. Висота дерев зазвичай близька до 50–

60 м, але може сягати 90–100 м (дерево аракурія). Якщо діаметр аракурії зазвичай не перевищує 1–1,5 м, то діаметр, наприклад, кипариса сягає 4–5 м. У середньому питома маса деревини $\bar{m} \approx 40 \text{ кг}/\text{м}^2$. В Україні ця величина близька до $10 \text{ кг}/\text{м}^2$, тобто у 4 рази менша.

Масштабність пожеж у лютому 2023 р. та у 2024 р. у Чилі, представлено на (рис. 1–4).

Важливо, що горіли не тільки лісові масиви, але й населені пункти. Пожежі 2024 р. у Чилі були дуже небезпечними: загинуло більше 123 осіб, багато зникли безвісті, більше 1000 чоловік було поранено, знищено більше 2000 житлових будинків, матеріальні збитки оцінено в ~2 млрд доларів США.



Рис. 1. – Лісова пожежа у лютому 2023 р. у Чилі

[https://static.ukrinform.com/photos/2023_02/thumb_files/630_360_1675581981-554.jpg]

Fig. 1. – Forest fire in February 2023 in Chile

[https://static.ukrinform.com/photos/2023_02/thumb_files/630_360_1675581981-554.jpg]



Рис. 2 – Чилійські пожежники ліквідовують наслідки горіння лісів у лютому 2024 р. у Чилі

[<https://i.obozrevatel.com/news/2024/2/5/filestoragetemp-2024-02-05t094714-7702.jpg?size=630x300>]

Fig. 2 – Chilean firefighters dealing with the consequences of forest burning in February 2024 in Chile

[<https://i.obozrevatel.com/news/2024/2/5/filestoragetemp-2024-02-05t094714-7702.jpg?size=630x300>]

Ще більш масштабними були лісові пожежі в Чилі 2013 та 2017 рр. та значно меншими у 2014 р. Про це свідчать зібрані з різних джерел дані, представлені у табл. 2.

Наведені у табл. 2 дані показують, що саме лісові пожежі у Чилі 2023 та 2024 рр., найбільш ймовірно стимульовані явищем Ель-Ніньйо, були безпрецедентними.



Рис. 3. – Горіння населених пунктів, спровоковане лісовими пожежами у лютому 2024 р. у Чилі
[https://img.lemde.fr/2024/02/03/0/0/5280/3520/556/0/75/0/562cdf2_5532156-01-06.jpg]

Fig. 3. – Burning of populated areas caused by forest fires in February 2024 in Chile
[https://img.lemde.fr/2024/02/03/0/0/5280/3520/556/0/75/0/562cdf2_5532156-01-06.jpg]



Рис. 4. – Пожежі у населених пунктах, спровоковані лісовими пожежами у лютому 2024 р. у Чилі
[https://media.cnn.com/api/v1/images/stellar/prod/gettyimages-1976108013.jpg?q=w_1110,c_fill/f_webp]

Fig. 4. – Fires in populated areas caused by forest fires in February 2024 in Chile
[https://media.cnn.com/api/v1/images/stellar/prod/gettyimages-1976108013.jpg?q=w_1110,c_fill/f_webp]

Площа пожеж сягала 550–580 тис. га або 3% від площі всіх лісів у країні. Матеріальні збитки склали десятки мільярдів доларів

США. У табл. 2 для порівняння наведено аналогічні параметри для найбільш масштабних пожеж в Україні в 2020 р.

Таблиця 2

Наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні та Чилі

Table 2

Consequences of large-scale forest fires in Ukraine and Chile

Параметр	Країна, рік				
	Україна, 2020	Чилі, 2014	Чилі, 2017	Чилі, 2023	Чилі, 2024
Площа пожеж, га	23000	>16000	580000	550000	>45000
Число вогнищ	>100	>70	119	>150	>200
Число загиблих	70	15	11	>50	131
Число поранених	110	>20	>20	>4000	>1000
Число знищених будівель	>300	2900	1610	>2000	~2000
Матеріальні збитки, млрд. дол.	~1	~0.8	~30	~20	~2

Результати аналізу екологічних наслідків горіння лісових масивів

Результати обчислень головних параметрів, що характеризують екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж у різні роки в Чилі, наведено у табл. 3. Для порівняння в цій таблиці також наведено аналогічні параметри пожеж в Україні у 2020 р.

Результати порівняння свідчать, що всі лісові пожежі у Чилі були більш потужні, ніж в Україні. Проте найбільш потужними

вони були в 2017 р. та 2023 р. При цьому площа пожеж перевищила 0,5 млн га, маса згорілих матеріалів – 200 Мт. Маса викидів диму була близька до 10 Мт, що у 160 тис. разів перевищує фонові значення диму над територією пожеж. Значними (близько 0,5 Гт) були викиди CO₂, які в 200 разів перевищили фонові значення цього газу. Ще більшим (у 4 тис. разів) були викиди CO.

Таблиця 3

Параметри екологічних наслідків горіння лісових масивів

Table 3

Parameters of the ecological consequences of forest burning

Параметр	Україна, 2020	Чилі, 2014	Чилі, 2017	Чилі, 2023	Чилі, 2024	Фонові значення в Чилі, 2023	Відносне збільшення в Чилі, 2023
Площа пожеж, га	23000	16000	580000	550000	43000	–	–
Маса згорілих матеріалів, Мт	2,3	6,4	232	220	17,2	–	–
Маса диму, Мт	0,09	0,26	9,28	8,8	1,08	$5,5 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^5$
Маса CO ₂ , Мт	5,2	14,4	522	495	38,7	25	200
Маса CO, Мт	0,23	0,64	23,2	22	1,72	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^3$
Маса С, кт	6,9	19,2	696	660	51,6	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^5$
Маса вуглеводнів, Мт	0,09	0,26	9,28	8,8	1,08	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^2$
Маса NO _x , кт	6,9	19,2	696	660	51,6	0,22	$3 \cdot 10^3$
Маса SO ₂ , кт	1,15–2,3	3,2–6,4	116–232	110–220	8,6–17,2	0,275	422–844
Маса ПАВ, т	46	128	4640	4400	344	$2,75 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^6$
Маса РМ 2.5, кт	23	64	2320	2200	172	$55 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^7$
Енерговиділення, ПДж	23	64	2320	2200	172	–	–
Середня тривалість, діб	10	10	20	20	10	–	–
Середня потужність горіння, ГВт	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,064	1,16	1,10	0,17	–	–
Енергія акустичного випромінювання, ПДж	$6,9 \cdot 10^{-2}$	0,064	7	6,6	0,52	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^3$
Потужність акустичного випромінювання, ГВт	23	64	700	660	52	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^5$

Дуже значними були викиди сажі, сягали приблизно 700 кт, що в 120 тис. разів перевищувало її фонові значення. Близько 10 Мт були викиди вуглеводнів. Вони у 160 разів перевищили фонове значення. Найбільшими були викиди мікронних частинок та ПАВ. Їхні маси перевищили фонові значення над лісами відповідно у 40 млн та більше ніж у 1,6 млн разів. Маса оксидів азоту перевершила фонове значення в 3 тис. разів, а маса оксидів сірки – приблизно в 0,4–0,8 тис. разів.

Як видно з даних, наведених у табл. 3, тепла енергія пожеж у Чилі у 2017 та 2023 рр. перевищувала 2 тис. ПДж, а середня потужність сягала ~1 ТВт. Для порівняння додамо, що все людство споживає енергію потужністю в 44 ТВт. Тобто потужність процесу горіння лісів тільки у Чилі у 2017 й 2023 рр. складала близько 2,5% від усієї споживаної людством потужності всіх енергоносіїв.

Енергія акустичного (в тому числі й шкідливого інфразвукового) випромінювання збільшилася у порівнянні з фоновим значенням приблизно в 1000 разів. Ще більше розючим (в 120 тис. разів) було збільшення у порівнянні з

фоновим значенням потужності цього випромінювання. Потужність акустичного випромінювання склала 700 ТВт. Для порівняння вкажемо, що це відповідає потужності 700 енергоблоків АЕС.

Екологічні наслідки лісових пожеж у Чилі на початку 2024 р. були приблизно на порядок меншими, ніж у 2017 та 2023 рр. Проте ці наслідки були майже на порядок більшими, ніж в Україні у 2020 р. (табл. 3).

Розраховані маси інжектіваних хімічних елементів у результаті лісових пожеж у Чилі наведено у табл. 4.

Як і в інших випадках, описаних у [1,2], найбільша емісія була для N (від 2 до 20 Мт), K (від ~5 до ~25 т) і Ca (від ~10 до ~20 т). Значними (одиниці тонн і більше) були викиди Fe, Zn та Cr. Помітно меншими були викиди інших хімічних елементів (табл. 4.).

Викиди були найбільшими у Чилі в 2017 та 2023 рр. На початку 2024 р. вони були приблизно на порядок меншими, ніж у 2017 та 2023 рр. Проте ці викиди майже в 10 разів перевищували викиди під час лісових пожеж в Україні в 2020 р.

Таблиця 4

Маса інжектіваних хімічних речовин при лісових пожежах

Table 4

Mass of chemicals injected during forest fires

Хімічний елемент	Україна, 2020	Чилі, 2014	Чилі, 2017	Чилі, 2023	Чилі, 2024
N, Мт	0,02–0,2	0,06–0,56	2–20	1,91–19,1	0,15–1,5
K, т	$(4,6–27,6) \cdot 10^{-2}$	0,13–0,77	4,6–27,6	4,41–26,5	0,35–2,07
Ca, т	$(9,2–18,4) \cdot 10^{-2}$	0,26–0,52	9,2–18,4	8,8–17,7	0,69–1,38
Fe, т	$(1,4–8,5) \cdot 10^{-2}$	0,04–0,24	1,4–8,5	1,34–8,16	0,11–0,64
Zn, т	$(1,6–20) \cdot 10^{-3}$	0,004–0,056	0,16–2	0,15–1,92	0,01–0,15
Cr, т	$(3,2–14,9) \cdot 10^{-3}$	$(8,9–41,4) \cdot 10^{-3}$	0,32–1,49	0,31–1,43	0,02–0,11
Vt, т	$(1,6–5,3) \cdot 10^{-3}$	$(4–14,7) \cdot 10^{-3}$	0,16–0,53	0,15–0,51	0,01–0,04
Mn, т	$(2,3–66,7) \cdot 10^{-4}$	$(6,4–185) \cdot 10^{-4}$	$(2,3–66,7) \cdot 10^{-2}$	$(2,2–64) \cdot 10^{-2}$	$(1,7–50) \cdot 10^{-3}$
Pb, т	$(9,2–18,4) \cdot 10^{-3}$	$(2,6–3,1) \cdot 10^{-2}$	0,92–1,84	0,88–1,77	$(6,9–13,8) \cdot 10^{-2}$
Rb, т	$(4,6–11,5) \cdot 10^{-4}$	$(1,3–3,2) \cdot 10^{-3}$	$(4,6–11,5) \cdot 10^{-2}$	$(4,4–11) \cdot 10^{-2}$	$(3,5–8,6) \cdot 10^{-3}$
Sr, т	$(2,3–11,5) \cdot 10^{-4}$	$(6,4–32) \cdot 10^{-4}$	$(2,3–11,5) \cdot 10^{-2}$	$(2,2–11) \cdot 10^{-2}$	$(1,7–8,6) \cdot 10^{-3}$
Se, т	$(2,3–6,9) \cdot 10^{-4}$	$(6,4–19,2) \cdot 10^{-4}$	$(2,3–6,9) \cdot 10^{-2}$	$(2,2–11) \cdot 10^{-2}$	$(1,7–8,6) \cdot 10^{-3}$

Результати аналізу екологічних наслідків горіння будівель у Чилі в 2024 р.

Відомо, що населені пункти часто можуть знаходитися у радіусі 5 км від лісових масивів. Це загрожує виникненню пожеж у населених пунктах під час великомасштабних лісових пожеж. Саме такими були обставини як під час пожеж в Україні, так і під час пожеж у Чилі. Так, практично в усі роки лісові пожежі викликали масові пожежі у населених пунктах

Чилі. Число знищених будівель коливалась від 2 до 3 тис. (табл. 2). Тому актуальним є дослідження екологічних наслідків горіння будівель у населених пунктах, стимульованих великомасштабними лісовими пожежами.

Більше того, продукти горіння лісів і житлових будинків поширюються далеко за межі території, охоплених пожежами. Цілі

міста «задиhaються» від диму. Жителі цих населених пунктів вимушені евакуюватися. Такими, наприклад, були чилійські міста Вільядель-Мар і Вальпараїсо під час пожеж у лютому 2024 р.

Результати розрахованих авторами мінімальних і максимальних значень маси емісії шкідливих речовин, що утворювалися внаслідок горіння житлових будинків у Чилі у 2023 р. та в Україні в 2020 р., наведено у табл. 5.

Наведені у табл.5 результати показують, що найбільші викиди властиві чадному газу. Вони могли змінюватися у широких межах: від сотні до десятка тисяч кілотонн. Дуже значні також були викиди сажі (від десятків до тисяч кілотонн). Значною була емісія й інших шкідливих хімічних речовин.

При розрахунках використовувалися узагальнені дані з різних джерел про типові значення концентрації шкідливих речовин при пожежах в будівлях (табл. 6).

Таблиця 5

Маса шкідливих речовин при пожежі у будівлях
(для України загальна площа – $3 \cdot 10^4$ м², для Чилі – $2 \cdot 10^5$ м²)

Table 5

Mass of hazardous substances during a fire in buildings
(for Ukraine the total area is $3 \cdot 10^4$ m², for Chile it is $2 \cdot 10^5$ m²)

Речовина	Україна, 2020	Чилі, 2023
CO, кг	900–15300	6000–102000
C, кг	270–900	1800–6000
CO ₂ , кг	90–630	600–4200
NO ₂ , кг	18–54	120–360
HCl, кг	9–18	60–90
HCN, кг	30	600
SO ₂ , кг	27–90	180–600
Інші вуглеводні	900–9000	$(0,6–6) \cdot 10^4$

Таблиця 6

Концентрація шкідливих речовин при пожежі у будівлях
площею 10–35 м² і середньою висотою 3 м

Table 6

Concentration of hazardous substances during a fire in buildings with an area of 10–35 m² and an average height of 3 m

Речовина	Гранично допустима концентрація, мг/м ³	Типові значення концентрації, мг/м ³	Питома концентрація, мг/м ²
CO ₂	916	$(1–7) \cdot 10^3$	$(0,3–2,1) \cdot 10^4$
CO	1	$(1–14) \cdot 10^4$	$(0,3–5,1) \cdot 10^5$
SO ₂	0,5	$(0,3–1) \cdot 10^3$	$(0,9–3) \cdot 10^3$
HCl	0,2	$(1–2) \cdot 10^2$	$(3–6) \cdot 10^2$
C	0,05	$(3–10) \cdot 10^3$	$(0,9–3) \cdot 10^4$
NO ₂	0,04	$(2–6) \cdot 10^2$	$(0,6–1,8) \cdot 10^3$
HCN	0,01	10^3	$3 \cdot 10^3$
Інші вуглеводні	0,1–1	$(1–10) \cdot 10^4$	$(0,3–3) \cdot 10^5$

Обговорення

Потужні лісові (і не тільки лісові) пожежі призводять як до короткотривалих, так й до довгострокових наслідків. Відносно нещодавно стало відомо, що мікрочастинки диму та сажі з розміром менше 2,5 мікрона (PM_{2,5}) здатні призводити до захворювання дихальної системи та серця. За даними ВООЗ за останні

20 років через підвищену концентрацію таких частинок померло більше 2,5 млн людей. Мікрочастинок в викидах міститься 0,5–1,3% від маси згорілих матеріалів. Так, при масі диму в 10 Мт маса мікронних частинок складає ~ 1–2 Мт. За площі в 1 млн км², що близько до площі Чилі або України та товщини атмосферного

шару з мікронними частинками 1 км маємо концентрацію цих частинок близько 1–2 мг/м³. Відомо, що їхня гранично допустима концентрація складає 0,01 мг/м³, тобто в 100–200 менше. Приблизно така концентрація мікронних частинок встановилася після перенесенням їх вітром на території України у 2020 р.

Виключно важливо, що мікронні частинки, як показали розрахунки авторів, знаходяться в атмосфері впродовж декількох місяців (табл. 7).

Дані табл. 7 демонструють, що най-більші мікронні частинки здатні знаходитися в атмосфері впродовж декількох місяців. Ще менші частинки ($r_p < 0,2$ мкм) теоретично можуть існувати ще довше. На зменшення концентрації частинок суттєво впливають переноси повітряних мас і атмосферні опади.

Окремо треба зупинитися на екологічних наслідках викидів ПАВ. Як відомо, до ПАВ належать хімічні сполуки, що містять два та більше конденсованих бензолних кільця в молекулі з молекулярною масою 128–276. ПАВ, що утворюються під час лісових пожеж, відрізняються від антропогенних бі- та трициклічними сполуками. Важливо, що викиди ПАВ, а також бензола, формальдегіда, фенола та важких металів, є канцерогенними,

мутагенними та тератогенними. Ці викиди за даними ВООЗ призводять до збільшення на 4–9% онкологічних захворювань та на 10% пухлин мозку.

Значними були викиди оксидів азоту та сірки, які здатні сформувати випадіння кислотних дощів.

Треба мати на увазі, що викиди шкідливих речовин у результаті великомасштабних лісових пожеж дуже значні, але вони на порядок менші за антропогенні викиди.

Масштаби пожеж і їхні екологічні наслідки в Чилі у 2017 та 2023 рр. були схожими. Якщо в 2023 р. вони були стимульовані явищем Ель-Ніньйо, то у 2017 р. пожежі та їхні наслідки були пов'язані з підвищенням температури повітря на 5°C. Попереднє явище Ель-Ніньйо мало місце в 2016 р. Значними були також екологічні наслідки, стимульовані явищем Ель-Ніньйо на початку 2024 р.

До екологічних наслідків слід віднести порушення лісових і прилеглих екосистем, втрати біорізноманіття, представників флори та фауни, у тому числі, занесених до Червоної книги. До цього слід додати втрати на відновлення лісів, порушення екологічних коридорів, ризики екологічних небезпек для населення, тощо.

Таблиця 7

Залежність швидкості та часу осідання мікронних частинок від їхнього радіусу
($\rho_p \approx 2 \cdot 10^3$ кг/м³, $z_p \approx 1$ км)

Table 7

Dependence of speed and settling time of micron particles on their radius
($\rho_p \approx 2 \cdot 10^3$ kg/m³, $z_p \approx 1$ km)

Радіус частинки, мкм	Швидкість осідання частинки, м/с	Час осідання частинки, с	Час осідання частинки, діб
0,05	$6,5 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^9$	$1,7 \cdot 10^4$
0,1	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,8 \cdot 10^8$	$4,4 \cdot 10^3$
0,2	10^{-5}	10^8	$1,2 \cdot 10^3$
0,4	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^7$	$2,8 \cdot 10^2$
0,6	$9,2 \cdot 10^{-5}$	$1,1 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^2$
0,8	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^6$	73
1	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^6$	45

Висновки

Потужні природні та антропогенні процеси призводять до підвищення частоти та інтенсивності лісових пожеж. Одним із чинників може бути періодичне потужне явище Ель-Ніньйо, яке розпочалося в кінці 2023 р. і продовжилося на початку 2024 р. Воно призвело до значного (до 5°C)

збільшення температури повітря в Південній Америці, інтенсифікації посухи та могло спровокувати потужні лісові пожежі в Чилі, вигорання будівель населених пунктів і інших катастрофічних екологічних наслідків. Пожежі супроводжувалися значними викидами продуктів горіння лісових масивів і

житлових будівель, емісією великих об'ємів хімічних елементів і інжекцією потужного акустичного випромінювання. Число поранених складало більше 4000 чоловік. Із зон пожежі та задимленості було евакуйовано тисячі мешканців. На територіях в 0,5 млн га в Чилі знищено величезну кількість представників тваринного та рослинного світу. Шкідливі речовини та дим повітряними масами переносилися на відстані в сотні-тисячі кілометрів від вогнищ пожеж. Значно постраждала інфраструктура населених пунктів. Крім будівель, пошкоджено транспортні засоби та інше майно. Важливим результатом цієї роботи є встановлення того факту, що горіння будівель, що межують з лісовими масивами, призводить до викидів значних мас шкідливих речовин, що можуть бути не тільки співставними з викидами під час горіння лісових масивів, а й набагато їх перевищувати.

Математичне моделювання та обчислення показали, що екологічні наслідки горіння великих лісових масивів і забудовель у Чилі в 2023–2024 рр. були катастрофічними. Вони могли бути спровокованими явищем Ель-Ніньйо. Для підтвердження ролі цього явища у підсиленні частоти та інтенсивності лісових пожеж потрібні подальші спостереження. Не менш масштабними були екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж у Чилі в 2017 р., викликані найбільшим спекотним на той час літом.

Площі пожеж у 2017 та 2023 рр. у Чилі сягали 0,5 млн га. Викиди диму наближались до 10 Мт, що у сто тисяч разів перевищувало фонове значення. Близько 0,5 Гт були викиди вуглекислоти. Вони у 200 разів перевищили фонове значення на території пожеж. Емісія

сажі, чадного газу та вуглеводнів перевищила фонове значення відповідно у 120 тис., 4 тис. і 160 разів. Маса викидів мікронних частинок і ПАВ перевищили фонове значення відповідно в 40 млн і в 1,6 млн разів. Маса емітованих оксидів азоту та сірки перевищили фонове значення відповідно в 3 тис. і в 0,4–0,8 раза. Енергія горіння перевищувала 2 тис. ПДж, а середня потужність горіння – 1 ТВт. Енергія акустичного випромінювання, що сягала 7 ПДж, перевищувала фонове значення більше ніж в 1000 разів. В той же час потужність цього випромінювання перевищувала фонове значення більше ніж у 100 тисяч разів і складала близько 700 ГВт. Найбільшими були викиди N, що сягали 1–10 Мт. Значною була емісія K, Ca, Fe, Zn, Cr та Br. Оцінено концентрацію та масу емітованих шкідливих речовин при горінні населених пунктів, спровокованих лісовими пожежами. Концентрація цих речовин у 100–200 разів перевищувала гранично допустимі. Вперше встановлено, що викиди речовин при цьому можуть бути на порядки більшими, ніж під час лісових пожеж. Вперше оцінено масу та концентрацію мікронних частинок диму, що призводять до захворювання дихальних шляхів та серцево-судинної системи жителів всієї країни та за її межами.

Масштаби лісових пожеж і їхні екологічні наслідки у Чилі в 2017 та 2023 рр. були більше ніж у 20 разів значнішими, ніж масштаби пожеж в Україні в 2020 р., що стали для нашої країни рекордними. Навіть короточасні пожежі у Чилі у лютому 2024 р. були більш потужними, ніж рекордні пожежі в Україні.

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. Черногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко Г.В., Черногор Л.Л. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні – влітку – восени 2020 р. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна серія «Екологія»*. 2021. № 24. С. 79–90. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-24-07>
2. Черногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко Г.В., Черногор Л.Л. Екологічні наслідки горіння лісових масивів у північній півкулі в 2020 р.: результати моделювання та кількісних розрахунків. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2021. № 25. С. 42–54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2021-25-04>
3. Черногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко Г.В., Черногор Л.Л. Моделювання параметрів великомасштабних лісових пожеж. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*.

- Серія «Екологія». 2022. № 26. С. 43–54. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2022-26-04>
4. Snegirev A. Yu., Marsden J.A., Francis J., Makhviladze G.M. Numerical studies and experimental observations of whirling flames. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47. No. 12–13. P. 2523–2539. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.002>
 5. 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. No. 11. P. 2031–2045. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0712-2>
 6. Hebert-Dufresne L., Pellegrini A.F.A., Bhat U., Redner S. Edge fires drive the shape and stability of tropical forests. *Ecology letters*. 2018. No. 6. P. 794–803. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12942>
 7. 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. No. 3. P. 1033–1047. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
 8. Dowdy A.J., Ye H., Pepler A., Thatcher M., Osbrough S.L., Evans J.P., Di Virgilio G., McCarthy N. Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific reports*. 2019. Vol. 9. No. 1. id: 10073. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>
 9. 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. No. 3. P. 386–403. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1>
 10. Буц Ю.В. Науково-методологічні основи релаксії екогосистем при техногенному навантаженні пірогенного походження: дис. ... д-ра техн. наук, спец.: 21.06.01 - екологічна безпека. Суми: СумДУ, 2020. 399 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/76769>
 11. 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. No. 5. P. 2047–2069. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13403>
 12. 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>
 13. 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>
 14. Chuvieco E., Pettinari M.L., Koutsias N., Forkel M., Hantson S., Turco M. Human and climate drivers of global biomass burning variability. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 779. id: 146361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146361>
 15. Coogan S.C., Daniels L.D., Boychuk D., Burton P.J., Flannigan M.D., Gauthier S., Kafka V., Park J.S., Wotton B.M. Fifty years of wildland fire science in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*. 2021. Vol. 51. No. 2. P. 283–302. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0314>
 16. Holuša J., Koreň M., Berčák R., Resnerová K., Trombik J., Vaněk J., Szczygiel R., Chromek I. A simple model indicates that there are sufficient water supply points for fighting forest fires in the Czech Republic. *International journal of wildland fire*. 2021. Vol. 30. No. 6. P. 428–439. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF20103>
 17. 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. No. 1. id: e01485. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>

Стаття надійшла до редакції 06.04.2024

Стаття рекомендована до друку 15.05.2024

L. F. CHERNOGOR¹, DSc (Physics and Mathematics), Prof.,
Head of the Department of Space Radio Physics
e-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5777-2392>

A. N. NEKOS¹, DSc (Geography), Prof.,
Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education
e-mail: alnekos999@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

G. V. TITENKO¹, PhD (Geography),
Head of Karazin Institute of Environmental Sciences
e-mail: titenko@karazin.ua ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-8477-0672>

L. L. CHORNOHOR¹,
Student of Karazin Institute of Environmental Sciences
e-mail: L.L.Chornohor@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5313-88501>

¹V. N. Karazin Kharkiv National University,
Svobody Sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine

THE INFLUENCE OF THE EL NIÑO PHENOMENON ON APPEARANCE OF LARGE-SCALE FOREST FIRES AND THEIR ECOLOGICAL CONSEQUENCES

The frequency and intensity of forest fires is increasing year by year. It is due to global warming, which is associated with both natural and anthropogenic phenomena and processes. There is another mechanism of global impact on the weather, abnormally high summer temperatures, severity and frequency of droughts, intensity and frequency of forest fires and their consequences. It is associated with the unique, cyclical, natural phenomenon of El Niño. The possibility of this phenomenon influence on the intensity of large-scale forest fires and their ecological consequences cannot be excluded, in accordance with the analysis of these processes and their quantitative assessment. There is reason to believe that the phenomenon may affect the intensity and frequency of forest fires in countries nearby. Such a country is, in particular, Chile, which experiences intense forest fires every year. Their intensity is compared to the intensity of record fires in Ukraine in 2020.

Purpose. Comparative assessment of the ecological consequences of large-scale forest fires stimulated by natural and anthropogenic impacts (using the example of Ukraine and Chile in 2014–2024).

Methods. Systems analysis of a number of accompanying processes, mathematical modeling and theoretical calculations. A methodology has been developed for assessing the ecological consequences of fires and burning of buildings in populated areas.

Results. Areas of fires in 2017 and 2023 reached 0,5 million ha in Chile. Smoke ejections approached 10 Mt, which was one hundred thousand times higher than the norm. There were about 0,5 Gt of carbon dioxide ejections. They exceeded the background value in the fire areas by 200 times. The ejection of soot, carbon monoxide and hydrocarbons exceeded the norm by 120 thousand, 4 thousand and 160 times, respectively. Ejections of PM 2.5 microparticles and polyaromatic hydrocarbons exceeded the norm by 40 million and more than a million times, respectively. Ejections of nitrogen and sulfur oxides exceeded the norm by 3 thousand and 400–800 times, respectively. The combustion energy exceeded 2 thousand PJ, and the average combustion power exceeded 1 TW. The acoustic radiation energy, reaching 7 PJ, exceeded the background value by more than 1000 times. At the same time, the power of this radiation exceeded the norm by more than one hundred thousand times and was about 700 GW. Nitrogen ejections were the largest, reaching 1–10 Mt. The ejection of potassium, calcium, iron, zinc, chromium, and bromine was significant. The ejections of other chemical elements were significantly less. The construction of mathematical models made it possible to calculate the concentration and mass of harmful substances emitted during the burning of populated areas caused by forest fires. For the first time, it was established that ejections of substances during this can be significant. For the first time, the need to take into account the influence of micron smoke particles and polyaromatic hydrocarbons, which lead, respectively, to diseases of the respiratory tract, cardiovascular system and oncological diseases of residents of the entire country and beyond, was substantiated, and their mass and concentration have been calculated. Ejections of nitrogen and sulfur oxides, which stimulate the occurrence of acid rain, have been assessed. A comparative analysis of the characteristics and consequences of forest fires showed that they were more large-scale in Chile in 2017 and 2023 (almost 20 times) and in February 2024 than the record fires in Ukraine in 2020 in terms of their parameters and consequences.

Conclusions. Mathematical modeling and calculations showed that the ecological consequences of large forests and buildings burning in Chile in 2023–2024 were catastrophic. They were accompanied by an intensification of the El Niño phenomenon. No less widespread were the ecological consequences of large-scale forest fires in Chile in 2017, caused by the hottest summer at that time. The size scale of fires in Chile and their consequences were many times higher than the corresponding parameters for the record fires in Ukraine in 2020.

KEYWORDS: *forest fire, burning of buildings, fire energy, ejections of combustion products, acoustic radiation energy, ecological consequences*

References

1. 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)
2. 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)
3. 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)
4. Snegirev, A.Yu., Marsden, J.A., Francis, J., & Makhviladze, G.M. (2004). Numerical studies and experimental observations of whirling flames. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(12–13), 2523–2539. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.02.002>
5. Adámek, M., Jankovská, Z., Hadincová, V., Kula, E., & Wild, J. (2018). Drivers of forest fire occurrence in the cultural landscape of Central Europe. *Landscape Ecology*, 33(11), 2031–2045. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0712-2>
6. 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>
7. 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>
8. Dowdy, A.J., Ye, H., Pepler, A., Thatcher, M., Osbrough, S.L., Evans, J.P., Di Virgilio, G., & McCarthy, N. (2019). Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. *Scientific reports*, 9(1). id: 10073. 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x>
9. 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>
10. Buts, Yu.V. (2020). 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/123456789/76769> (in Ukrainian)
11. 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. (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>
12. Kelly, A.J., & Hodges, K.E. (2020). Post-fire salvage logging reduces snowshoe hare and red squirrel densities in early seral stages. *Forest Ecology and Management*, 473. id: 118272. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118272>
13. Wilson, N., Bradstock, R., & Bedward, M. (2021). Detecting the effects of logging and wildfire on forest fuel structure using terrestrial laser scanning (TLS). *Forest Ecology and Management*, 488. id: 119037. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119037>
14. Chuvieco, E., Pettinari, M.L., Koutsias, N., Forkel, M., Hantson, S., & Turco, M. (2021). Human and climate drivers of global biomass burning variability. *Science of the Total Environment*, 779. id: 146361. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146361>
15. Coogan, S.C., Daniels, L.D., Boychuk, D., Burton, P.J., Flannigan, M.D., Gauthier, S., Kafka, V., Park, J.S., & Wotton, B.M. (2021). Fifty years of wildland fire science in Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 51(2), 283–302. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0314>
16. 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>
17. Turner, M.G., Braziunas, K.H., Hansen, W.D., Hoecker, T.J., Rammer, W., Ratajczak, Z., Westerling, A.L., & Seidl, R. (2022). The magnitude, direction, and tempo of forest change in Greater Yellowstone in a warmer world with more fire. *Ecological Monographs*, 92(1). id: e01485. <https://doi.org/10.1002/ecm.1485>

The article was received by the editors 06.04.2024

The article is recommended for printing 15.05.2024