УДК 551.510/.509.68+614.841.42

Лариса Анатоліївна Писаренко,
м. н. с. відділу прикладної метеорології та кліматології,
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
пр-т Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,
e-mail: larpys@uhmi.org.ua, https://orcid.org/0000-0002-2885-0213;
Михайло Валерійович Савенець,
к. геогр. н., с. н. с. відділу моніторингу атмосфери,
Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України,
e-mail: savenetsm@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9429-6209

ПОЖЕЖІ В ЕКОСИСТЕМАХ ТА ВПЛИВ НА АТМОСФЕРУ

У роботі досліджуються просторовий розподіл пожеж в екосистемах та їх наслідки для атмосфери, пов'язані із емісією продуктів горіння і подальшим впливом на перебіг атмосферних процесів. Аналіз згорілої частки, внеску лісових пожеж та пожеж на землях аграрного призначення, потоків вуглецю і сухої частки в атмосферу проведено на даних та інвентаризаціях GFED4 за період 1997–2016 рр. Для додаткового аналізу впливу продуктів горіння на атмосферу залучено супутникові дані світлопоглинаючого аерозольного індексу OMI (Aura) та дані метеорологічних спостережень. Встановлено кількість згорілої частки лісів та земель аграрного призначення, проаналізовано сезонні особливості та тенденції зміни площі пожеж в екосистемах. Досліджено потоки вуглецю та сухої частки внаслідок горіння біомаси та показано необхідність обов'язкового врахування емісії продуктів горіння з пожеж на полях для оцінки якості атмосферного повітря в Україні. Максимальні значення потоку речовини спостерігаються під час лісових пожеж на Поліссі, проте найбільшого просторове поширення продуктів горіння спостерігається внаслідок пожеж на полях в період з березня по квітень та з липня по вересень. Аналіз залежності світлопоглинаючого аерозольного індексу від згорілої частки та потоків речовини в атмосферу показав можливість його використання як індикатора наявності продуктів горіння в атмосфері, починаючи із значень 0.2–0.4. Серед можливих наслідків значної емісії продуктів горіння для атмосферних процесів можуть бути локальне зниження температури повітря під час періоду пожежі та зменшення кількості днів із опадами у наступний місяць після інтенсивних пожеж. Попередня оцінка показала зменшення позитивної аномалії температури з 0.7 до 0.1°C та зменшення кількості днів із опадами вдвічі, за умови, що середньомісячне значення світлопоглинаючого аерозольного індексу перевищило 1.2.

***Ключові слова**: пожежі, емісія, згоріла частка, продукти горіння, вуглець, суха частка, аерозольний індекс.*

***Л. А. Писаренко, М. В. Савенец. ПОЖАРЫ В ЭКОСИСТЕМАХ И ВЛИЯНИЕ НА АТМОСФЕРУ**. В работе исследуется пространственное распределение пожаров в экосистемах и их последствия для атмосферы, связанные с эмиссией продуктов горения и дальнейшим влиянием на атмосферные процессы. Анализ сгоревшей доли, вклада лесных пожаров и пожаров на землях аграрного назначения, потоков углерода и сухих частиц в атмосферу проведен с использованием данных и инвентаризаций GFED4 за период 1997 – 2016 гг. Для дополнительного анализа влияния продуктов горения на атмосферу использованы спутниковые данные светополгощающего аэрозольного индекса OMI (Aura) и данные метеорологических наблюдений. Исследовано количество сгоревшей доли лесов и земель аграрного назначения, проанализированы сезонные особенности и тенденции изменения площади пожаров в экосистемах. Исследованы потоки углерода и сухих частиц вследствие горения биомассы и показана необходимость обязательного учета эмиссии продуктов горения во время пожаров на полях для оценки качества атмосферного воздуха в Украине. Максимальные значения потока вещества наблюдаются во время лесных пожаров на Полесье, однако наибольшее пространственное распространение продуктов горения наблюдается вследствие пожаров на полях в период с марта по апрель и с июля по сентябрь. Анализ зависимости светопоглощающего аэрозольного индекса от сгоревшей доли и потоков вещества в атмосферу показал возможность его использования как индикатора наличия продуктов горения в атмосфере, начиная со значений 0.2–0.4. Среди возможных последствий значительной эмиссии продуктов горения для атмосферных процессов могут быть локальное понижение температуры воздуха во время пожаров и уменьшение количества дней с осадками в следующий месяц после интенсивных пожаров. Предварительная оценка показала уменьшение позитивной аномалии температуры с 0.7 до 0.1°C, а также уменьшение количества дней с осадками вдвое, при условии, что среднемесячные значения светопоглощающего аэрозольного индекса превысили 1.2.*

***Ключевые слова**: пожары, эмиссия, сгоревшая доля, продукты горения, углерод, сухие частицы, аэрозольный индекс.*

Вступ. Щороку Україна стикається з проблемою пожеж в екосистемах, переважна частина з яких є результатом недбалого поводження людей з вогнем на відкритій місцевості, умисних підпалів та «традиційного» випалювання сухого травостою на полях [1]. Враховуючи кліматичні зміни, що спостерігаються на території України, збільшується ймовірність виникнення пожеж у зв'язку з більшою повторюваністю пожежонебезпечних умов [2,3]. Пожежі в екосистемах призводять до ряду негативних наслідків, включаючи загибель рослинного та тваринного світу [4-6], деградації ґрунту [7,8], емісії значної кількості шкідливих домішок в атмосферу, що призводить до погіршення якості атмосферного повітря та впливу на здоров'я населення [9,10]. Не став виключенням і березень – квітень 2020 року, під час якого випалювання сухого травостою на полях та умисні підпали призвели до жахливих наслідків та займання лісів, в тому числі і в зоні відчуження та безумовного (обов'язкового) відселення навколо Чорнобильської АЕС [1,11].

Пожежі в екосистемах здійснюють вплив на атмосферу через зміни хімічного складу атмосфери (емісія продуктів горіння) [9,10], і через подальші процеси взаємодії продуктів горіння з

© Писаренко Л. А., Савенець М. В., 2020 *https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-19*

радіаційними потоками та під час процесів хмароутворення [12]. В Україні досліджень впливу пожеж на хімічний склад атмосфери, зазвичай, зводиться до вивчення лісових пожеж [13-15], вважаючи що кількість згорілої біомаси є визначальною у погіршенні якості атмосферного повітря. При цьому, практично недослідженим залишаються потоки речовини внаслідок пожеж на полях та супутні зміни забруднення атмосфери. Так як ліси займають лише 15.9% території України [16], емісія продуктів горіння внаслідок пожеж на землях аграрного призначення є вкрай недооціненими.

Метою даних досліджень є встановлення внеску пожеж в екосистемах території України на потоки хімічних складових в атмосферу та можливі зміни метеорологічних процесів.

Вихідні дані та методика досліджень. Для дослідження частки згорілої території та внеску лісових пожеж і на землях аграрного призначення використано глобальну базу даних емісії від пожеж (Global Fire Emission Database – GFED), зокрема її четверту версію (4s), що включає в себе інформацію про «малі» пожежі (small fires) [17-20]. Дані GFED4 представлені як квадрати з просторовою роздільною здатністю 0.25x0.25°. Дані пожеж у GFED отримані із використанням продукту супутника MODIS для виявлення пожеж та згорілої частки під назвою MCD64A1, просторова роздільна здатність якого 500 м. Згоріла частка у квадраті розміром 0.25x0.25° є відносним показником площі території, що опинилася під вогнем протягом одного місяця.

Аналіз емісії речовини в атмосферу внаслідок горіння біомаси здійснено за інвентаризацією емісії з бази даних GFED для вуглецю та сухої частки. Емісії представлені як середньомісячний показник. Прийнятими одиницями вимірювання потоків вуглецю в атмосферу є г·м^2·місяць$^{-1}$, тоді як сухої частки – кг·м^2·місяць$^{-1}$. Дані четвертої версії GFED4, охоплюють період 1997 – 2016 рр., що і стало основним періодом досліджень в даній роботі. На жаль, дані з 2017 р. ще проходять процес обробки та верифікації, проте оновлення версії до GFED5 очікується найближчим часом [21].

У роботі використано супутникові дані світлопоглинаючого аерозольного індексу (absorbing aerosol index (AAI)), що є хорошим індикатором наявності продуктів горіння в атмосфері. Більш того, за допомогою AAI можливо вивчати вплив на атмосферу, так як аерозоль визначає процеси хмароутворення та радіаційного перенесення. Використано дані супутникового приладу Ozone Monitoring Instrument (OMI) на супутнику Aura з просторовою роздільною здатністю 1x1° [22] за період з жовтня 2004 до кінця 2016 року. Вибір початку періоду обумовлений запуском супутникового приладу OMI та рішенням не використовувати дані попереднього приладу Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) через неузгодженість сітки їх спостережень. Кінець періоду обрано з урахуванням кінця періоду бази GFED. AAI є лише частиною загального аерозольного індексу, що характеризується лише позитивними значеннями, в той час як загальний аерозольний індекс може мати негативні значення. Позитивні значення AAI свідчать про наявність вуглецевмісних аерозолів у своєму складі, що здатні поглинати сонячне випромінення. Негативні значення, що не використовуються для загального аерозольного індексу, відображають хмарність, сульфатні аерозолі, тощо.

З метою аналізу можливого впливу на атмосферні процеси, використано дані наземних метеорологічних спостережень на станціях обласних центрів України за період, що співпадає з періодом даних AAI – 2004–2016 рр. Дані наявні в архівах Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського. Враховуючи можливі впливи аерозолю, для досліджень обрано параметри, що могли зазнати потенційного впливу: температура повітря, бал хмарності, кількість днів з опадами більше 0 мм, та більше 5 мм. У зв'язку із прив'язкою усіх розрахунків до бази даних GFED, дані температури та хмарності осереднено за місяць, кількість днів із опадами взято для кожного місяця. Враховуючи сезонність метеорологічних характеристик, доцільно досліджувати не тільки безпосередньо виміряні метеорологічні величини, але й їх аномалії, тобто різницю від середніх значень. Це дозволяє в окремих випадках уникнути хибної залежності, обумовленою впливом сезонності на досліджувані показники. Середні значення для кожного місяця обчислено для обраного періоду досліджень, аномалії – різниця фактичних значень від розрахованих середніх багаторічних. Процедура обчислення аномалій проведена для температури повітря та хмарності.

Достовірність результатів статистичних обчислень, представлених у роботі, перевірено критеріями Стьюдента та Фішера із 95%-м рівнем забезпеченості результату.

Результати досліджень. ***Характеристики просторово-часового розподілу пожеж в екосистемах.*** Використовуючи дані GFED проаналізовано згорілу частку території у кожному з квадратів розміром 0.25x0.25°. Загалом, у випадку пожежі в екосистемі в середньому спостерігається згоряння 20–30% площі території (рис. 1А). В Українських Карпатах та вздовж берегової лінії, зазвичай, згорає менше 10%, на Поліссі – 10–30%. Існують осередки, переважно на Лівобереж-

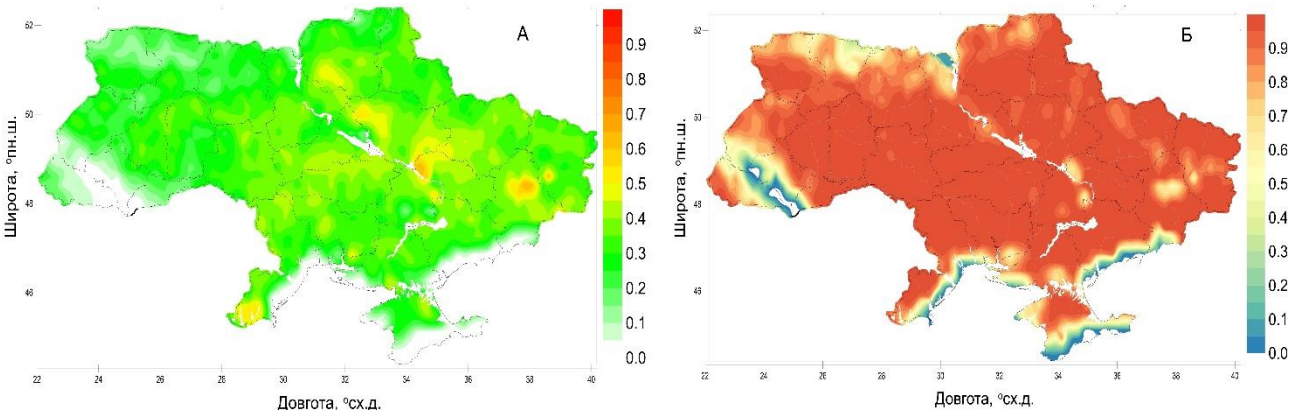


Рис. 1. Середня частка згорілої території у випадку пожежі (А) та частка пожеж на землях аграрного використання відносно загальної площі пожеж на території (Б)

ній частині України, де в середньому пожежі в екосистемах призводять до згоряння більше 50% площі.

Частка пожеж, які припадають на землі аграрного використання, становлять більше 90% (рис. 1Б). Встановлено, що навіть у районах зі значним відсотком лісових насаджень, близько 50% згорілої площі припадає на «нелісові» землі. В цілому, на території України існують наступні райони, де пожежі на землях аграрного використання не є переважаючими: Українські Карпати, крайній північ Полісся, Чорнобильська зона відчуження, берегова лінія Чорного й Азовського морів, а також промислово навантажені райони.

Подібний розподіл частки згорілої площі свідчить про обов'язкову необхідність врахування пожеж на полях з метою оцінки потоків хімічних складових в атмосферне повітря. Незважаючи на суттєву більшу кількість згорілої біомаси у випадку лісових пожеж, просторове охоплення пожеж на землях аграрного використання може мати визначальний вплив на наявність продуктів горіння в атмосферному повітрі.

У річному ході повторюваності, поширення та потужності пожеж в екосистемах спостерігається не тільки залежність від сезонності та метеорологічних умов, але й від особливостей господарської діяльності населення. Очевидно, що у період з листопада до лютого практично не спостерігається пожеж в екосистемах. Проте, у березні – квітні різко зростає кількість пожеж, для яких характерно саме значне просторове охоплення по всій території України, а згоріла частка часто характеризується найбільшими значеннями у році. Причиною появи першого максимуму кількості пожеж є практика спалювання сухого травостою на полях. Після зменшення кількості пожеж у травні – червні, спостерігаються максимуми липня–серпня, пов'язані із сприятливими метеорологічними умовами: високими температурами, низьким вологовмістом атмосфери та ґрунту. У вересні – жовтні кількість пожеж зменшується, проте знову може спостерігатися збільшення просторового охоплення, причиною якого є господарська діяльність населення та спалювання на полях.

Найбільші площі охоплені пожежами спостерігалися у 2001 та 2008 рр. Проте, мова йде саме про масштабність просторового охоплення: потужніші, але більш локалізовані пожежі спостерігалися у 1999, 2005, 2007 та 2012 рр. у різних регіонах території України. У 2003 р. спостерігається абсолютний мінімум усіх характеристик пожеж в екосистемах за досліджуваний період.

Тенденції зміни частки згорілої площі відрізняються залежно від регіону, при цьому за досліджуваний період спостерігаються ділянки зі статистично значущими позитивними та негативними трендами (рис. 2).

Найбільшого занепокоєння викликають території західної України, де не спостерігається тенденцій до зменшення площі пожеж в екосистемах. На окремих ділянках виявлено збільшення площі під пожежами на 60–80% у перерахунку на 10 років. В цілому, значущі позитивні тренди площі пожеж в екосистемах спостерігаються у Львівській, Тернопільській, Хмельницькій, Рівненській, Житомирській, Чернігівській, Вінницькій, Одеській, Донецькій та Луганській областях. Для областей центральної України характерне зменшення площі пожеж, досягаючи на окремих ділянках 60% за 10 років. Подібні тенденції найбільше характерні для Київської, Черкаської, Кіровоградської, Дніпропетровської та Миколаївської областей.

Емісія речовини в атмосферу. Використовуючи інвентаризацію емісії речовини з бази GFED4, виявлено особливості змін хімічного складу атмосфери через емісію вуглецю та сухої частки внаслідок горіння біомаси. Загалом, спостерігається подібний просторовий розподіл обох потоків речовин (рис. 3).

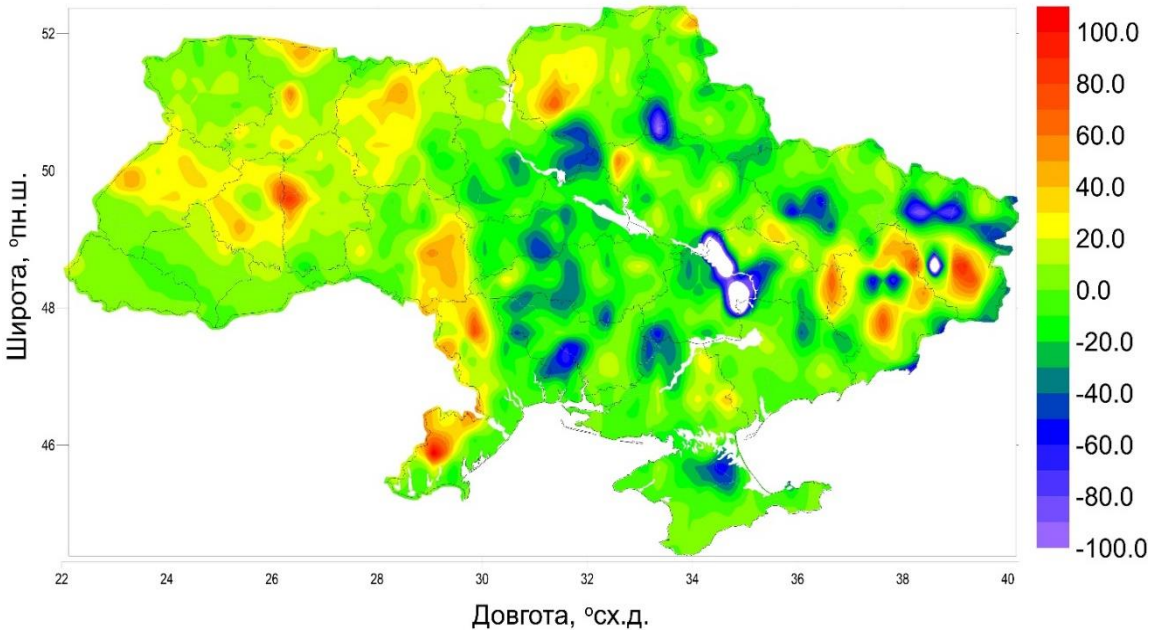


Рис. 2. Тенденції зміни площі пожеж в екосистемах (у перерахунку на % за 10 років)

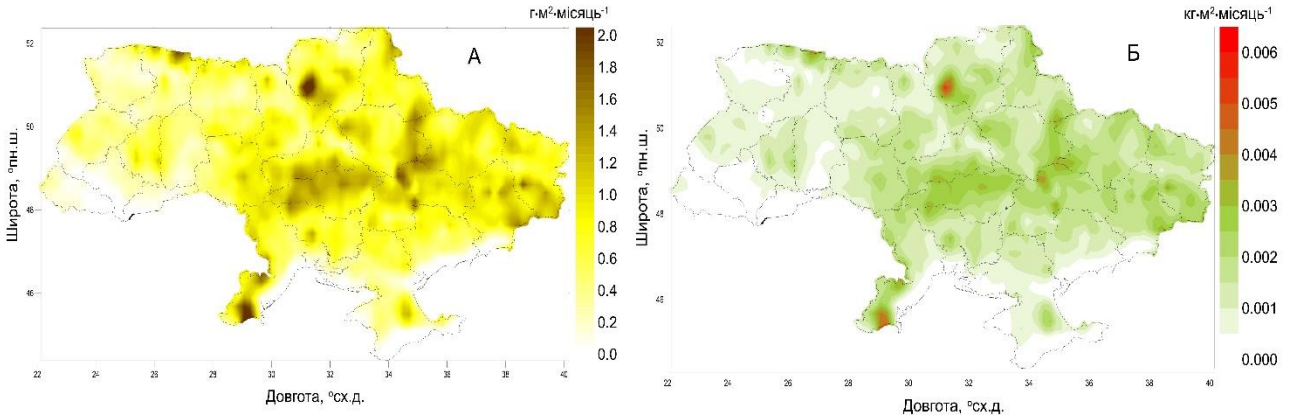


Рис. 3. Середня багаторічна емісія вуглецю (А) та сухої частки (Б) в атмосферу внаслідок горіння біомаси

Емісія на території України відбувається вкрай неоднорідно, характеризуючись чіткими локальними максимумами. Такі максимуми найчастіше узгоджуються із часткою згорілої площі (рис. 1А), проте невідповідності існують в районах поширення лісів. Причина невідповідності в заліснених районах очевидна – більше біомаси на одиничну ділянку. Таким чином незначні за площею пожежі призводять до більш потужної емісії хімічних складових.

Середні багаторічні значення емісії вуглецю для території України переважно варіюють в межах 0.2–1.0 г·м^2·місяць$^{-1}$. Для потоків сухої частки середні значення складають переважно 0.001–0.003 кг·м^2·місяць$^{-1}$. Найменша емісія речовини спостерігається вздовж берегової лінії та на заході України. Проте, ситуація у західних районах може значно погіршитися у зв'язку із стрімкою тенденцією до збільшення площі горіння. У центральних районах України емісія вуглецю та сухої частки внаслідок горіння біомаси значно більша: 1.4–1.8 г·м^2·місяць$^{-1}$ та 0.003–0.004 кг·м^2·місяць$^{-1}$ відповідно. Саме центральна Україна характеризується однією із найбільших часток згорілої площі, при цьому емісія відбувається саме із земель аграрного використання. Враховуючи тенденції до зменшення згорілої площі, очікуємо зменшення емісії речовини внаслідок горіння біомаси у центральних районах та, цілком ймовірне, вирівнювання внеску у потоки речовини із західними районами.

Для території України характерні три локалізації потужної емісії продуктів горіння в атмосферу, де середні потоки вуглецю перевищують 1.8 г·м^2·місяць$^{-1}$, а потоки сухої частки – 0.005 кг·м^2·місяць$^{-1}$. Серед найбільших локалізацій емісії речовини добре вивченими є процеси на крайньому півночі території України. Це лісові

пожежі, що спостерігаються на Поліссі, при цьому пожежі спостерігалися там і в останні 2 роки. У 2020 р. в період з середини березня до середини квітня вони зумовили неодноразове погіршення якості атмосферного повітря в Україні [11], а у 2019 р. стали причиною одного із найбільших потоків моноксиду вуглецю в атмосферу [23]. Ще дві локалізації поблизу м. Козелець та на півдні Одеської області викликають запитання, адже спалювання там відбувається у набагато більших масштабах, ніж навколишніх районах. І хоча, потрібно мати на увазі, що модельні розрахунки можуть мати неточності, проте систематичність появи великої частки згорілої площі у цих двох локалізаціях та повторення там пожеж у 2020 р. [1] свідчать про реальну велику емісію продуктів горіння в атмосферу.

Отримані результати за емісіями вуглецю та сухої частки підтверджують, що викиди від спалювання на полях в Україні співставні за об'ємами із викидами від лісових пожеж. При цьому, площа, охоплена такими викидами у рази перевищує площу, з яких спостерігається емісія від лісових пожеж, а отже і кількість населення, що зазнає негативного впливу, значно більша.

Розрахунок та аналіз багаторічних тенденцій зміни потоку вуглецю та сухої частки показують найбільш негативні наслідки на крайньому півночі території України, де тренди емісії досягають найвищих значень (рис. 4). При цьому тренд потоків вуглецю досягає 0.2 г·м^2·місяць$^{-1}$, а потоків сухої частки $4\cdot10^{-4}$ кг·м^2·місяць$^{-1}$, що у перерахунку на 10 років досягає 24 г·м^2·місяць$^{-1}$ та 0.05 кг·м^2·місяць$^{-1}$ відповідно.

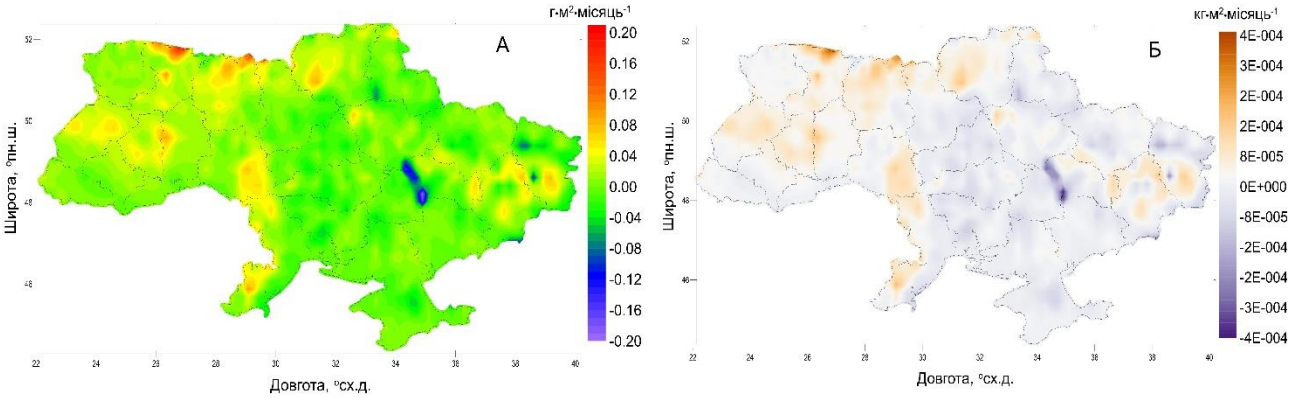


Рис. 4. Тенденції зміни емісії вуглецю (А) та сухої частки (Б) в атмосферу внаслідок горіння біомаси

Емісія продуктів горіння в атмосферу характеризується чіткими сезонними змінами, пов'язаними із сільськогосподарським випалюванням та сезонністю пожеж. Середні багаторічні значення для кожного місяця весняного, літнього та осіннього сезонів наведені у Додатках 1 та 2. Чітко виокремлюються два періоди інтенсивних пожеж та емісії продуктів горіння: березень – квітень та липень – вересень. Навесні найбільший потік хімічних домішок у атмосферне повітря спостерігається на північних територіях України, досягаючи 0.01 кг·м^2·місяць$^{-1}$ для сухої частки (Додаток 1) та 3.6 г·м^2·місяць$^{-1}$ для вуглецю (Додаток 2). Після дуже незначної емісії у травні – червні, спостерігаються максимальні значення липня – серпня, досягаючи найбільшої емісії на півдні території України: для сухої частки 0.014 кг·м^2·місяць$^{-1}$ та для вуглецю 4.8 г·м^2·місяць$^{-1}$.

Найбільша емісія речовин за досліджуваний період спостерігалася у 2008р., коли і частка згорілої площі набула найбільшого поширення. Внаслідок значного охоплення території пожежами на землях аграрного використання, емісія вуглецю та сухої частки була значною у 2001, 2005, 2006, 2007, 2009, 2011 та 2014 рр. На півночі території України у зоні Полісся значна емісія спостерігалася у 2002 та 2015 рр.

З метою пошуку зв'язку модельних даних емісії речовини зі змінами фактичних значень хімічного складу атмосфери та подальшими дослідженнями впливу на атмосферні процеси, проаналізовано дані супутникових спостережень за AAI. Суха частка та вуглець, отримані з модельних даних GFED не мають ідентичного показника за даними фактичних спостережень. Тому для порівняння та дослідження зв'язку із реальними даними використано потік сухої частки та дані AAI супутника OMI, як найбільш подібних із показників, що можливо порівняти між собою. Ускладнює порівняння і той факт, що модель враховує виключно емісію внаслідок горіння біомаси під час пожеж в екосистемах, тоді як аерозоль в атмосфері, що вимірюється супутниковими даними, характеризується різноманітністю джерел надходження, в тому числі й антропогенних.

Просторовий аналіз даних AAI із даними згорілої частки з GFED показали просторове узгодження в районах найбільш інтенсивних по-

жеж. При цьому, дані супутникових спостережень вловлюють усі значні емісії продуктів горіння. Незважаючи на наявність зв'язку за візуальним аналізом просторового розподілу показників, за попереднім пошуком чисельної залежності однозначних результатів отримати не вдалося. Проведення детального аналізу за різними регіонами найбільш інтенсивних пожеж в екосистемах дозволив виділити чіткий та статистично надійний зв'язок між емісією сухої частки та AAI. Так як емісія продуктів горіння від пожеж на землях аграрного призначення відрізняється від емісії лісових пожеж, було відділено такі райони один від одного. Для дослідження зв'язку у випадку лісових пожеж, виділено три точки на крайньому півночі території України, що потрапляють на зону лісів у Волинській, Рівненській та Житомирській областях. Для аналізу випадків пожеж на землях аграрного призначення, обрано три точки на зону центральної України, де середня згоріла частка сільськогосподарських земель досягає 90% – у Черкаській, Дніпропетровській та Кіровоградській областях. Для обох територій, зв'язок між модельними даними емісії сухої частки та фактичними даними супутникових спостережень за AAI наявний у випадку емісії більше ніж 0.005 кг·м^2·місяць$^{-1}$ (рис. 5). Більш того, в обох випадках коефіцієнт кореляції між показниками є статистично надійним та складає близько 0.65. Кожна точка на рис.5 відображає один місяць, коли спостерігалася значна емісія сухої частки та відповідні значення осередненого за місяць AAI.

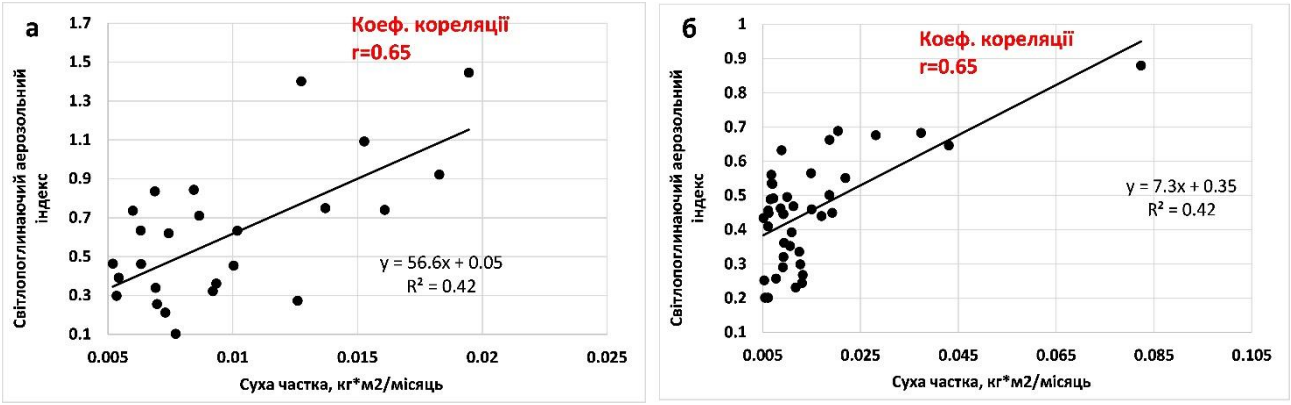


Рис. 5. Зв'язок емісії сухої частки модельних даних та AAI супутникових спостережень для північних (а) та центральних (б) районів України

В цілому, над усією територією України AAI зі значеннями більше 0.2 починає відображати наявність продуктів горіння в атмосфері, що найчастіше відповідає емісіям сухої частки близько 0.005 – 0.01 кг·м^2·місяць$^{-1}$. В середньому, за умови емісії більше 0.015 кг·м^2·місяць$^{-1}$, AAI перевищує 0.4; при потоках речовини більше 0.02 кг·м^2·місяць$^{-1}$ AAI перевищує 0.6.

Загалом, AAI є хорошим індикатором емісії продуктів горіння в атмосферу спричинених пожежами в екосистемах, та при значеннях більше 0.4 може використовуватися для вивчення взаємозв'язків емісії внаслідок пожеж та перебігу атмосферних процесів, зокрема поглинання/розсіювання сонячної радіації, процесів опадоутворення та численних прямих і непрямих ефектів.

Можливі наслідки для атмосферних процесів. Для дослідження реакції атмосфери на надходження значної емісії продуктів горіння внаслідок пожеж в екосистемах використано дані спостережень на метеорологічних станціях усіх обласних центрів України, наявні в архівах Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського. Дані AAI отримано для точок, що координатно співпадають із обласними центрами України. Незважаючи на те, що пожежі в екосистемах відбуваються на деякій віддалі від місць проведення метеорологічних спостережень, дослідження реальних інтегральних місячних метеорологічних параметрів та вмісту аерозолю на деякій відстані від пожеж вважаємо більш доцільним, аніж використання модельних даних реаналізу у точках, що близькі до місць горіння.

З огляду на результати вище описаних обчислень, усі середньомісячні метеорологічні показники досліджувалися за умови значної емісії внаслідок пожеж в екосистемах та перевищення середньомісячних значень AAI 0.4 над точкою спостережень. Подібна фільтрація суттєво зменшує довжину рядів спостережень у точці, що може мати наслідки для отримання статистично надійних результатів. Тому, для усієї території України зібрано усі випадки, коли спостерігалася емісія сухої частки більше 0.005 кг·м^2·місяць$^{-1}$, а середньомісячний вміст світлопоглинаючих аерозолів над обласним центром перевищував AAI>0.4. Такі випадки об'єднано у єдиний масив

даних, який містить 317 випадків, та суттєво збільшує достовірність отриманих результатів. Враховуючи використання середньомісячних значень та відносну рівномірність розташування обласних центрів на території України, отриманий масив містить у собі повну варіативність погодних умов, просторове покриття та сезонні особливості. Це дозволяє отримати узагальнені закономірності для території України.

В результаті досліджень зміни метеорологічних параметрів протягом місяців зі значними емісіями продуктів горіння та у наступний місяць, виявлено відгук температурних умов та кількості днів із опадами на наявність продуктів горіння в атмосфері та підвищених значень AAI (рис. 6). Загалом, у місяць, коли спостерігається потужна емісія речовини внаслідок пожеж, температура повітря характеризується позитивними аномаліями (рис. 6б). Це є логічним проявом залежності пожежонебезпечних умов від температури. Проте, збільшення емісії сухої частки поблизу точки метеорологічних спостережень більше 0.015 кг·м^{2}·місяць$^{-1}$ та вмісту світлопоглинаючих аерозолів в атмосфері більше AAI>0.9 призводить до зменшення позитивної аномалії температури повітря. За AAI в межах 0.9–1.2 позитивна температурна аномалія знижується з 0.7°C до 0.3–0.4°C, а у випадку AAI більше 1.2 – до 0.1°C. Тобто, за пожеж в екосистемах, що призводять до дуже потужної емісії речовини в атмосферу, спостерігається локальне зниження температури повітря, внаслідок більшої кількості аерозолю в атмосфері, що зменшує надходження прямої сонячної радіації на земну поверхню.

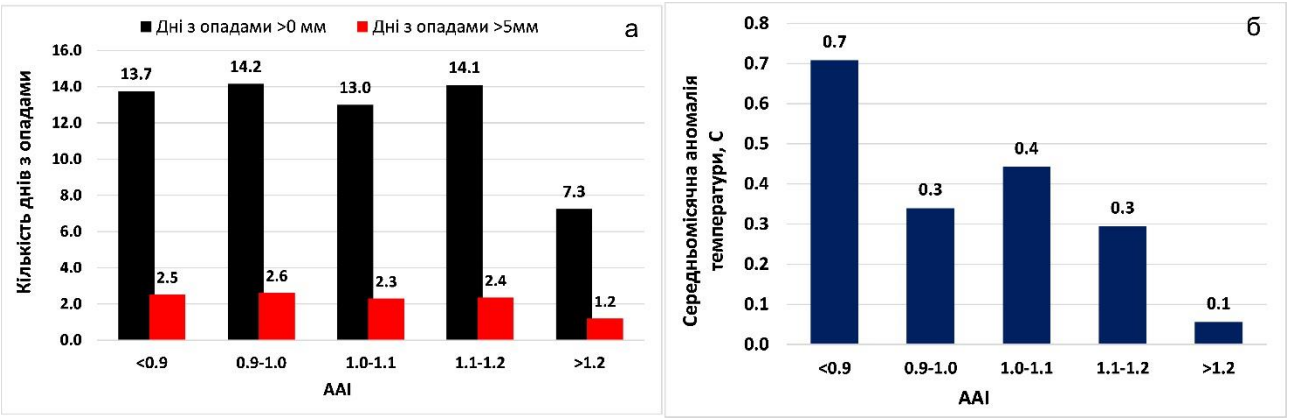


Рис. 6. Осереднене значення кількості днів із опадами на наступний місяць після емісії продуктів горіння (а) та середньомісячна аномалія температури у місяць зі значною емісією (б) за різних значень AAI

У наступний місяць після емісії речовини внаслідок горіння біомаси спостерігається локальне зменшення кількості днів із опадами (рис. 6а). За AAI більше 1.2 кількість днів з опадами більше 0 мм зменшується вдвічі – з 13-14 днів до 7 днів, а кількість днів з опадами більше 5 мм – з 2-3 днів до 1 дня. Хмарність, при цьому, також характеризується незначним відгуком, зменшуючись в середньому на 10–20%. Причина зменшення кількості опадів, ймовірно, пов'язана з фізико-хімічними особливостями аерозолів різного походження. В цілому, аерозолі є ядрами конденсації, що сприяють хмароутворенню та збільшенню кількості опадів. Проте, хімічний склад аерозолів, що утворюються в результаті горіння біомаси та містять вуглець, не є ядрами конденсації. Сучасними дослідженнями у різних частинах планети [12,24,25] підтверджується можливість зменшення кількості опадів внаслідок потрапляння великої кількості продуктів горіння біомаси в атмосферу.

Обговорення. Отримані результати досліджень свідчать про недооцінку впливу пожеж на землях аграрного призначення на емісію продуктів горіння в атмосферу у порівнянні з лісовими пожежами. У той час як спалювання сухого травостою викликає обговорення переважно з точки зору негативного впливу на ґрунти, вплив на поширення продуктів горіння в атмосферу залишається недостатньо представленим. Враховуючи активну позицію уряду щодо вирішення проблеми випалювання на полях [26,27], розширення подібних досліджень іншими науковцями щодо емісії речовини внаслідок горіння та подальшого впливу на якість атмосферного повітря має можливість бути використаними під час формування планів дій та відповідних рішень.

Результати досліджень щодо можливого впливу емісії продуктів горіння на зміни атмосферних процесів потребують подальшого аналізу та залучення методів хіміко-метеорологічного моделювання. Отримані у роботі залежності температури повітря та опадів мають теоретичне підґрунтя та не суперечать останнім дослідженням [12,24,25]. Проте, автори вважають, що практичне використання отриманих числових

закономірностей можливе після підтверджень інтегрованим моделюванням із залученням схем, що враховуються прямі та непрямі ефекти аерозолю різного хімічного складу. У даній роботі ж отримано необхідний емпіричний матеріал для порівняння із результатами інтегрованого хіміко-метеорологічного моделювання, та покращення обчислювальних схем, що враховують поведінку аерозолю в атмосфері.

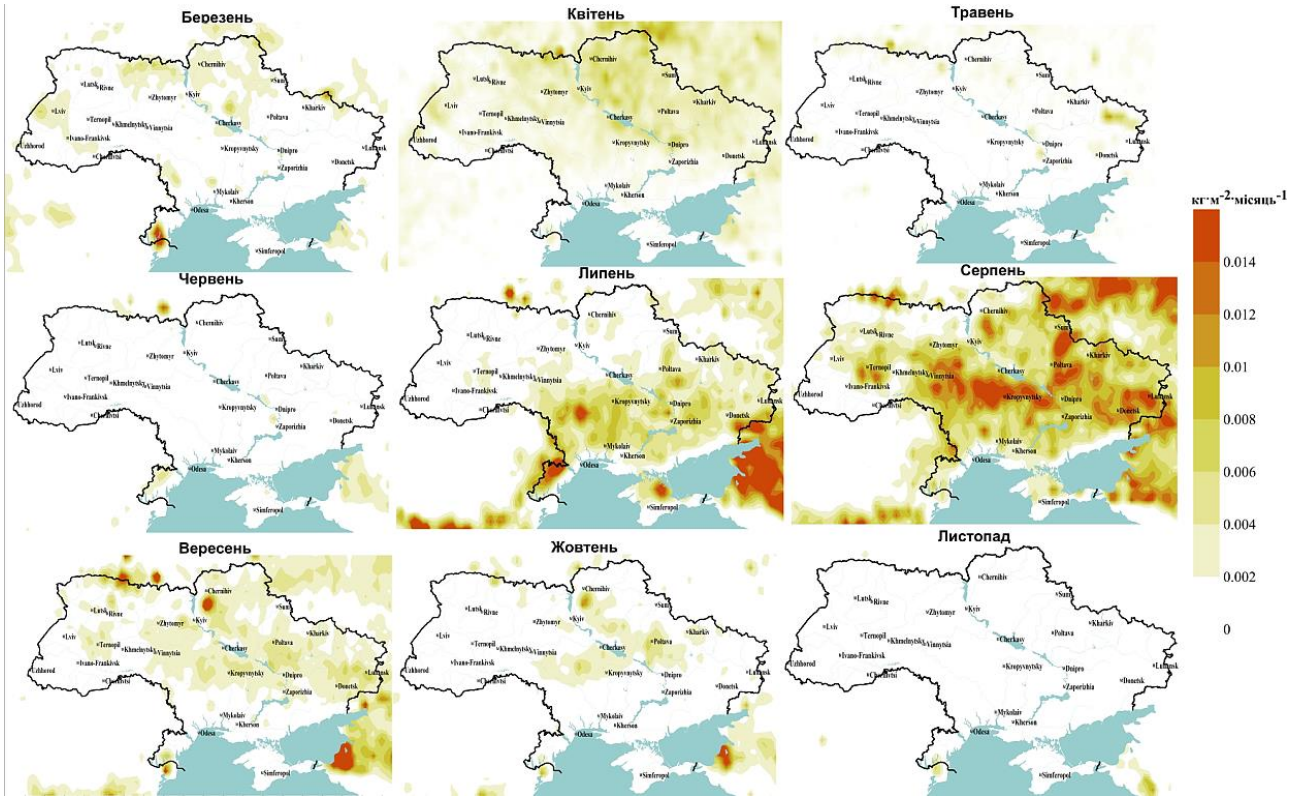
Прикінцева примітка. У квітні 2020 р., незважаючи на численні лісові пожежі та кількаразове погіршення якості атмосферного повітря над різними районами території України, середньомісячне значення AAI у жодній точці не перевищило 0.9. Цьому сприяли різнонаправленість вітру протягом місяця та зміна осередків найбільш активних пожеж. Таким чином, пожежі квітня 2020 р. не підпадають під категорію тих, за якими можливо досліджувати закономірності впливу на атмосферу, знайдених у даній роботі.

Висновки. Пожежі в екосистемах призводять до вигоряння близько 10–30% території, у випадку поширення вогню. В середньому на території України, близько 90% згорілої частки припадає на землі аграрного призначення. Тенденції до збільшення згорілої частки характерні для західних та північних територій України. Основними періодами пожеж є березень – квітень та липень – вересень, що й визначають емісію продуктів горіння в атмосферу. Найбільші емісії вуглецю та сухої частки характерні для лісів Полісся, досягаючи 2 г·м^{2}·місяць$^{-1}$ та 0.005 кг·м^{2}·місяць$^{-1}$ відповідно, проте найбільше поширення продукти горіння відбувається внаслідок пожеж на землях аграрного призначення. Світлопоглинаючий аерозольний індекс може бути використаний як індикатор продуктів горіння в атмосфері за умови використання значень від 0.2–0.4. Серед можливих наслідків значної емісії продуктів горіння в атмосферу є короткострокове локальне зменшення позитивних аномалій температури повітря та зменшення вдвічі кількості опадів у наступний місяць після пожеж в екосистемах. У подальших дослідженнях авторами буде використано онлайн-інтегроване хіміко-метеорологічне моделювання випадків з пожежами в екосистемі для вивчення прямих та непрямих ефектів аерозолю в атмосфері.

Подяки. *Дослідження проведені в рамках проекту Enviro-PEEX on ECMWF: «Pan-Eurasian EXperiment (PEEX) Modelling Platform research and development for online coupled integrated meteorology-chemistry-aerosols feedbacks and interactions in weather, climate and atmospheric composition multi-scale modelling» (2018–2020)*

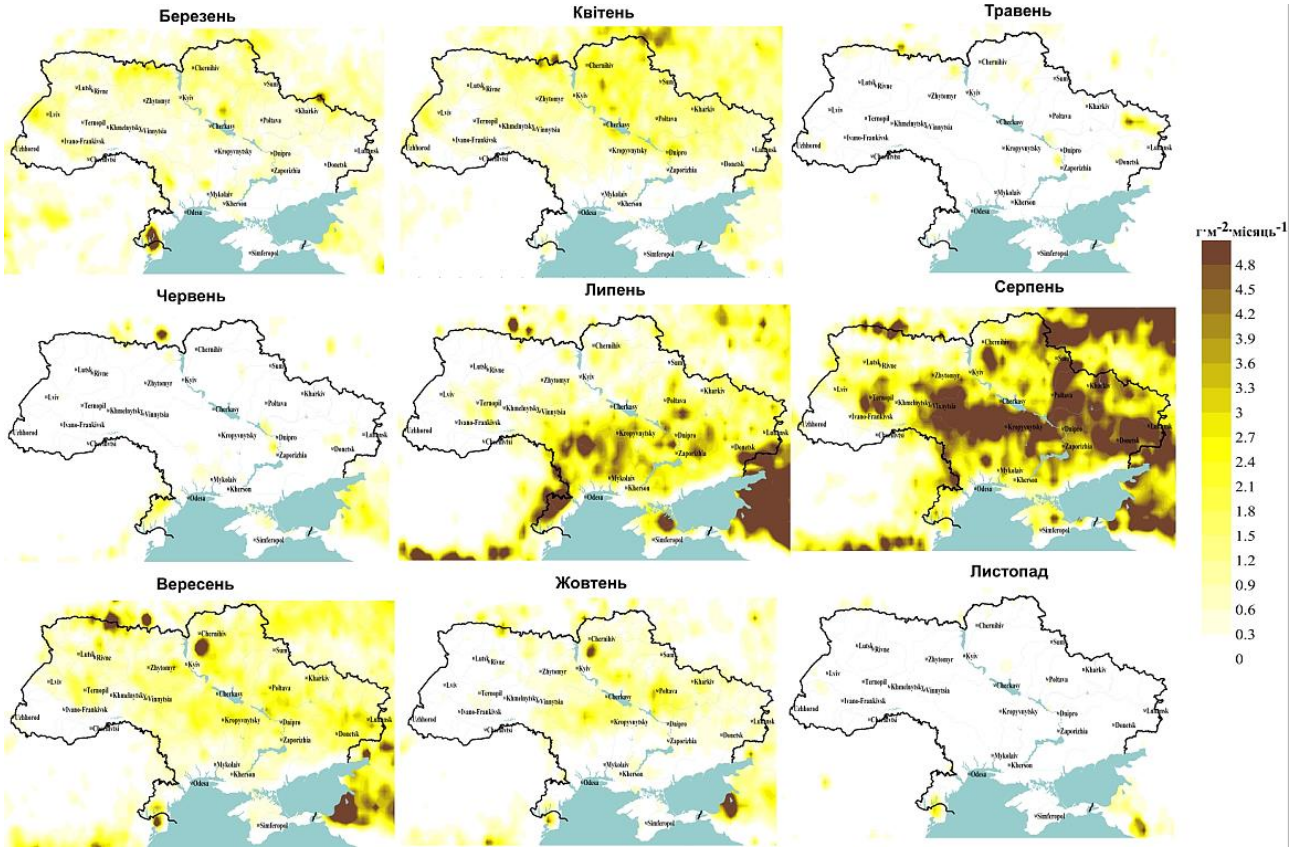
Додаток 1

Середня багаторічна емісія сухої частки для березня – листопада



Додаток 2

Середня багаторічна емісія вуглецю для березня – листопада



Література

1. *Статистика пожеж. ДСНС України [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://undicz.dsns.gov.ua/ua/Statistika.html (Дата звернення: 27.04.2020)*
2. *Балабух В.О., Зібцев С.В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожеж у північно-чорноморському регіоні України [Текст]/ В.О. Балабух, С.В. Зібцев// Український гідрометеорологічний журнал. – 2016. - №18. – С. 60-71. [https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07]*
3. *Balabukh V. Impact of climate change on natural fire danger in Ukraine [Text]/ V. Balabukh, L. Malytska// Idojaras. – 2017. – 4(121). – P. 453-477*
4. *Гуменюк В. Вплив низової пожежі на соснові деревостани у зоні Центрального Полісся України [Текст]/ В. Гуменюк, Д. Голяка, С. Зібцев// Науковий вісник НЛТУ України. – 2015. – №25(9). – С. 41-49. [https://doi.org/10.15421/40250907]*
5. *Brown J.K. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora [Text]/ J.K. Brown, J.K. Smith// USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. – 2000. – Vol. 2. – p. 257*
6. *Nasi R. Forest Fire and Biological Diversity [Text]/ R. Nasi, R. Dennis, E. Meijaard, G. Applegate, P. Moore// Unasylva. – 2002. – Vol. 53(209). – P. 36-40.*
7. *Малиновская И.М. Влияние пожара на состояние микробиоценоза почвы восьми- и двадцатилетних залежей [Текст]/ И.М. Малиновская// Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2012. - №(1). – С.20-24. [https://doi.org/10.31210/visnyk2012.01.05]*
8. *Neary D.G. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water [Text]/ D.G. Neary, K.C. Ryan, L.F. De Bano// Gen. Tech. Rep. – 2008. – Vol. 4. – 250 p.*
9. *Andreae, M.O. Emissions of trace gases and aerosol from biomass burning [Text]/ M.O. Andreae, P. Merlet.// Global Biogeochem. Cy. – 2001. – Vol. 15. –P. 955–966.*
10. *van der Werf, G.R. Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004 [Text]/ G.R. van der Werf, J.T. Randerson, L. Giglio, G.J. Collatz, P.S. Kasibhatla, A.F. Arellano// Atmos. Chem. Phys. – 2006. – Vol. 6 – P. 3423–3441.*
11. *Звітна інформація за моніторингом пожеж. УкрГМІ ДСНС України та НАН України [Електронний ресурс]/ Режим доступу: https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/ (Дата звернення: 29.04.2020)*
12. *Whang Y. New Directions: Light absorbing aerosols and their atmospheric impacts [Text]/ Y. Whang, A. Khalizov, M. Levy, R. Zhang// Atmospheric Environment. – 2013. – Vol. 81. – P. 713-715*

13. *Галицька Є.І. Динаміка аерозолів у атмосфері над східною Європою за даними Aeronet під впливом погодних умов протягом літа 2010 [Текст]/ Є.І. Галицька, В.О. Данилевський, С.І. Сніжко// Український гідрометеорологічний журнал. – 2016. – №17. – С. 5-16*
14. *Galytska E. Increased Aerosol Content in the Atmosphere over Ukraine During Summer 2010 [Text]/ E. Galytska, V. Danylevsky, R. Hommel, J.P. Burrows// Atmospheric Measurement Techniques. – 2018. – Vol. 11. – P. 2101-2118. [https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018]*
15. *Mahura A. Integrated Multi-Scale Modelling for Meteorology-Chemistry-Aerosol Interactions [Text]/ A. Mahura, R. Nuterman, G. Nerobelov. M. Sedeeva, S. Smyshlyaev, M. Savenets, L. Pysarenko, S. Krakovska, S. Ivanov, S. Michaelide, I. Ruban, A.S. Sassi, R. Makkonen, A. Baklanov, T. Petaja, S. Zilitinkevich, M. Kulmala// Report Series in Aerosol Science. – 2019. – Vol. 226. – P. 425-429*
16. *Загальна характеристика лісів України. Державне агентство лісових ресурсів України. [Електронний ресурс]/ Режим доступу: http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=62921&cat_id=32867 (Дата звернення: 28.04.2020)*
17. *Giglio L. Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4) [Text]/ L. Giglio, J.T. Randerson, G.R. van der Werf// JGR Biogeosciences. – 2013. – Vol. 118(1). – P. 317-328. [https://doi.org/10.1002/jgrg.20042]*
18. *Global Fire Emission Database [Електронний ресурс]/ Режим доступу: https://www.globalfiredata.org/index.html (Дата звернення: 26.04.2020)*
19. *Randerson J.T. Global burned area and biomass burning emissions from small fires [Text] / J.T. Randerson, Y. Chen, G.R. van der Werf, B.M. Rogers, D.C. Morton// JGR Biogeosciences. – 2012. – Vol. 117(G4). [https://doi.org/10.1029/2012JG002128]*
20. *van der Werf G.R. Global fire emissions estimates during 1997–2016 [Text]/ G.R. van der Werf, J.T. Randerson, L. Giglio, T.T. van Leeuwen, Y. Chen, B.M. Rogers, M. Mu, M. J.E. van Marle, D.C. Morton, G. J. Collatz, R.J. Yokelson, P.S. Kasibhatla// Earth Syst. Sci. Data. – 2017. – Vol. 9. – P. 697–720. [https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017]*
21. *GFED Fire Monitoring. [Електронний ресурс]/ Режим доступу: https://tftei.citepa.org/images/files/2019-10-22-23-24/3.%20MARINELAND-UN-FIRE-WORSHOP-242019.pdf (Дата звернення: 21.04.2020)*
22. *OMI Aura Atmospheric Chemistry. [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html (Дата звернення: 21.04.2020)*
23. *Савенець, М. Сучасний стан забруднення атмосферного повітря в Україні за даними супутника Sentinel-5P [Текст]/ М. Савенець, І. Дворецька, Л. Надточій // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, Серія «Геологія. Географія. Екологія». – 2019. – Вип. 51. – С. 221-233. [https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-16]*
24. *Yoon J.-H. The role of carbonaceous aerosols on short-term variations of precipitation over North Africa [Text] / J.-H. Yoon, P.J. Rasch, H. Wang, V. Vinoj, D. Ganguly// Atmospheric Science Letters. – 2016. – Vol. 17(7). – P. 407-414. [https://doi.org/10.1002/asl.672]*
25. *Zeng N. Causes and impacts of the 2005 Amazon drought [Text] / N. Zeng, J.-H. Yoon, J.A. Marengo, A. Subramaniam, C.A. Nobre, A. Mariotti, J.D. Neelin// Environmental Research Letters. – 2008. – Vol. 3. – P. 014002 [https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/014002]*
26. *Ініціативи щодо посилення відповідальності за підпали сухої рослинності. [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://menr.gov.ua/news/35054.html (Дата звернення: 30.04.2020)*
27. *Штрафи за спалення рослинності. [Електронний ресурс] / Режим доступу: https://menr.gov.ua/news/35078.html (Дата звернення: 30.04.2020)*

***Внесок авторів**: всі автори зробили рівний внесок у цю роботу.*

UDC 551.510/.509.68+ 614.841.42

Larysa Pysarenko,
Junior Researcher, Department of Applied Meteorology and Climatology,
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU,
37, Nauki Av., Kyiv, 03028, Ukraine,
e-mail: larpys@uhmi.org.ua, https://orcid.org/0000-0002-2885-0213;
Mykhailo Savenets,
PhD (Geography), Senior Researcher, Department of Atmosphere Monitoring,
Ukrainian Hydrometeorological Institute of SESU and NASU,
e-mail: savenetsm@gmail.com, https://orcid.org/0000-0001-9429-6209

FIRES IN ECOSYSTEMS AND INFLUENCE ON THE ATMOSPHERE

Introduction. Fires in ecosystems, mostly after open burning, affect Ukrainian territory each year causing flora and fauna damage, soil degradation, pollutants emission, which impact air quality and human health. Fires influence the atmosphere by adding burned products and its further direct and indirect effects. Despite majority of fires are open burning, research of forest fire emissions prevail among Ukrainian scientists. Therefore, **the study aimed** to analyze the influence of all-type fires in Ukrainian ecosystems on substances fluxes to the atmosphere and possible changes of meteorological processes.

Data and methodology. The study uses GFED4 data and inventories for analyses of forest and agricultural burned fraction, carbon and dry matter emissions for the period of 1997–2016. Additional data includes absorbed aerosol index derived from OMI (Aura) instrument and ground-based meteorological measurements.

Results. Burning fraction indicates the 10 to 30% of area influencing in case of active fires. More than 90% of fires in Ukrainian ecosystems happened on the agricultural lands. The highest trends of active fires appear on the western and northern part of Ukraine, whereas burned fraction on the central territories reached up to 60% decreasing per decade. Most fires happened during two periods: March – April and July – September. The most severe fires occurred in 1999, 2001, 2005, 2007, 2008 and 2012.

Average emissions in Ukraine vary from 0.2 to 1.0 $g \cdot m^2 \cdot month^{-1}$ for carbon and from 0.001 to 0.003 $kg \cdot m^2 \cdot month^{-1}$ for dry matter. There are three localizations of huge burning products emissions, where maximal average values reach 1.8 $g \cdot m^2 \cdot month^{-1}$ for carbon and 0.005 $kg \cdot m^2 \cdot month^{-1}$ for dry matter. The biggest one occurred in the Polissia forest region. Despite the maximal emission from forest fires, open burning results the biggest coverage and air quality deteriorating.

Absorbing aerosol index (AAI) could be good indicator of fires in Ukrainian ecosystems and burning products emissions. Overall, AAI with values more than 0.2 correspond to dry matter emissions of 0.005–0.01 $kg \cdot m^2 \cdot month^{-1}$. If AAI exceed 0.4 usual dry matter emissions exceed 0.02 $kg \cdot m^2 \cdot month^{-1}$.

The study finds local scale changes of air temperature and days with precipitation due to huge burning products emissions. In case of monthly average AAI exceed 1.2 during fires events, positive air temperature anomaly at the ground decrease from 0.7 to 0.1°C. The main reason is absorption of solar radiation in the atmosphere. During the next month after intensive fires in ecosystems, days with precipitation have twofold decrease: from 13-14 to 7 days with precipitation more than 0 mm, and from 2-3 to 1 day with precipitation more than 5 mm. The reason might be changes of cloudiness formation due to elevated concentrations of carbonaceous aerosols. The results obtained for atmospheric changes is planned to be verified and compared using online integrated atmospheric modelling.

Keywords: fires, emission, burned fraction, burning products, carbon, dry matter, aerosol index

References

1. *Fires statistics. State Emergency Service of Ukraine. Available at: https://undicz.dsns.gov.ua/ua/Statistika.html*
2. *Balabukh, V. O., Zibtsev, S. V. (2016). Impact of climate change on quantity and area of forest fires in the northern part of the Black Sea Region of Ukraine. Ukrainian Hydrometeorological Journal, (18), 60-71. [https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07]*
3. *Balabukh V., Malytska L. Impact of climate change on natural fire danger in Ukraine. Idojaras. 2017. 4(121): 453-477.*
4. *Gumeniuk, V., Golyaka, D., Zibtsev, S. (2015). Ground Fire Effects on Pine Stands of Central Polissya of Ukraine. Scientific Bulletin of UNFU, 25(9), 41-49. [https://doi.org/10.15421/40250907]*
5. *Brown J.K., Smith J. K. (2000). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep., (2), 257.*

6. *Nasi R., Dennis R., Meijaard E., Applegate G., Moore P. (2002). Forest Fire and Biological Diversity. Unasylva, 53(209), 36-40.*
7. *Malinovskaya I.M. (2012). An influence of fire upon the soil microbiocoenosis state of lea lands of not enough and long standing. Bulletin of Poltava State Agrarian Academy, (1), 20-24. [https://doi.org/10.31210/visnyk2012.01.05]*
8. *Neary D.G., Ryan K.C.; De Bano L.F. (2008). Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep., (4), 250.*
9. *Andreae M.O., Merlet P. (2001). Emissions of trace gases and aerosol from biomass burning. Global Biogeochem. Cy., (15), 955–966.*
10. *van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Kasibhatla P.S., Arellano, A.F. Jr. (2006). Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004. Atmos. Chem. Phys., (6), 3423–3441.*
11. *Report on wildfire monitoring. UHMI of SESU and NASU. Available at: https://uhmi.org.ua/msg/fire2020/*
12. *Whang, Y., Khalizov, A., Levy, M., Zhang, R. (2013). New Directions: Light absorbing aerosols and their atmospheric impacts. Atmospheric Environment, (81), 713-715.*
13. *Galytska E., Danylevsky V., Snizhko S. (2016) Aerosols dynamics in the atmosphere over Eastern Europe by means of AERONET according to weather conditions during summer 2010. Ukrainian Hydrometeorological Journal, (17): 5-16.*
14. *Galytska E., Danylevsky V., Hommel R., Burrows J.P. (2018) Increased Aerosol Content in the Atmosphere over Ukraine During Summer 2010. Atmospheric Measurement Techniques, (11), 2101-2118. [https://doi.org/10.5194/amt-11-2101-2018]*
15. *Mahura A., Nuterman R., Nerobelov G., Sedeeva M., Smyshlyaev S., Savenets M., Pysarenko L., Krakovska S., Ivanov S., Michaelides S., Ruban I., Sassi A.S., Makkonen R., Baklanov A., Petaja T., Zilitinkevich S., Kulmala M. (2019) Integrated Multi-Scale Modelling for Meteorology-Chemistry-Aerosol Interactions. Report Series in Aerosol Science, (226), 425-429*
16. *The general features of Ukrainian forests. The State Forest Resources Agency of Ukraine. Available at: http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=62921&cat_id=32867*
17. *Giglio L., Randerson J.T., van der Werf G.R. (2013). Analysis of daily, monthly, and annual burned area using the fourth-generation global fire emissions database (GFED4). JGR Biogeosciences. 118(1), 317-328. [https://doi.org/10.1002/jgrg.20042]*
18. *Global Fire Emission Database. Available at: https://www.globalfiredata.org/index.html*
19. *Randerson J.T., Chen Y., van der Werf G.R., Rogers B.M., Morton D.C. (2012). Global burned area and biomass burning emissions from small fires. JGR Biogeosciences, 117(G4). [https://doi.org/10.1029/2012JG002128]*
20. *van der Werf G.R., Randerson, T., Giglio L., van Leeuwen, T.T., Chen, Y., Rogers, B.M., Mu M., van Marle, M.J.E., Morton, D.C., Collatz, G.J., Yokelson, R.J., Kasibhatla, P.S. (2017) Global fire emissions estimates during 1997–2016. Earth Syst. Sci. Data, (9): 697–720. [https://doi.org/10.5194/essd-9-697-2017]*
21. *GFED Fire Monitoring. Available at: https://tftei.citepa.org/images/files/2019-10-22-23-24/3.%20MARINELAND-UN-FIRE-WORSHOP-242019.pdf*
22. *OMI Aura Atmospheric Chemistry. Available at: https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html*
23. *Savenets, M., Dvoretska, I., Nadtochii, L. (2020). Current state of atmospheric air pollution in Ukraine based on Sentinel-5P satellite data. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology", (51), 221-233. [https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-16]*
24. *Yoon J.-H., Rasch P.J., Wang H., Vonoj V., Ganguly D. (2016). The role of carbonaceous aerosols on short-term variations of precipitation over North Africa. Atmospheric Science Letters, 17(7), 407-414. [https://doi.org/10.1002/asl.672]*
25. *Zeng N, Yoon JH, Marengo JA, Subramaniam A, Nobre CA, Mariotti A, Neelin JD. (2008). Causes and impacts of the 2005 Amazon drought. Environmental Research Letters (3): 014002 [https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/014002]*
26. *Initiatives on enhancing the responsibility for open burning. Ministry of energy and environment protection of Ukraine. Available at: https://menr.gov.ua/news/35054.html*
27. *Fees for open burning. Ministry of energy and environment protection of Ukraine. Available at: https://menr.gov.ua/news/35078.html*