

Т. Д. Лев, М. М. Талерко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Аналіз і моделювання метеорологічних умов поширення радіонуклідів у періоди лісових пожеж та пилової бурі в Чорнобильській зоні відчуження

Ключові слова:

моделі чисельного прогнозу погоди, екстремальна метеорологічна ситуація, бази метеорологічних даних, моделювання атмосферного перенесення, радіонукліди

Проведено моделювання метеорологічних умов поширення радіоактивних аерозолів в атмосфері в періоди лісових пожеж (2015, 2018, 2020 та 2022 рр.) та пилової бурі (16–17 квітня 2020 р.) у Чорнобильській зоні відчуження з використанням архіву даних реаналізу Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF). Моделювання метеоумов і підготовка аеросиноптичної інформації для моделі атмосферного перенесення та осадження забруднюючих речовин LEDI в періоди інтенсивної емісії радіонуклідів в атмосферу проводилося з використанням двох джерел інформації: результатів чисельної моделі прогнозу погоди США WRF-ARW з використанням баз даних Проєкту реаналізу та прогностичних даних, отриманих за глобальною моделлю GFS та оперативною моделлю ECMWF, які зберігаються в базі даних сховища кліматичних даних CDS (ERA5 Copernicus). Чисельна модель WRF-ARW, що використовується, адаптована для території України шляхом вибору моделей параметризації головних фізичних процесів в атмосфері відповідно до синоптичних ситуацій та сезону року. Дано опис типових та екстремальних синоптичних ситуацій у аналізовані періоди лісових пожеж із використанням архіву синоптичних карт приземного тиску та топографії AT500 для Європейської території та сучасних технологій геоінформаційних систем.

Вступ

Погодні умови відіграють істотну роль у процесі перенесення забруднюючих речовин у повітрі на різні відстані від джерела забруднення та при осадженні їх на підстильну поверхню. Погодні умови можуть бути:

типovими, пов'язаними з основними баричними утвореннями для визначеної території у визначену пору року, що впливають на затримання та винесення забруднюючих речовин із території лісової пожежі або пилової бурі,

екстремальними, що збільшують інтенсивність емісії радіонуклідів в атмосферу та, відповідно, вторинне радіоактивне забруднення об'єктів довкілля в зоні впливу джерела емісії.

Завдання використання результатів чисельного моделювання та прогнозування атмосферних процесів у приземному шарі атмосфери для моделей повітряного перенесення та осадження забруднюючих речовин у період лісових пожеж та пилових бур є актуальною, особливо у випадку радіоактивного забруднення території. Використання чисельних моделей прогнозу погоди є обов'язковою умовою сучасного

© Т. Д. Лев, М. М. Талерко, 2022

оперативного прогнозування перенесення забруднюючих речовин у повітрі [1–8]. Проте майже для всіх чисельних схем прогнозу погоди характерна невизначеність (неточність) у прогнозуванні метеорологічних елементів, що пояснюється надзвичайною складністю фізико-математичного опису процесів взаємодій у системі «атмосфера — земля — океан» [2, 7]. Тому багато дослідників у своїх розробках використовують архівні дані реаналізу метеоінформації, отримані провідними метеорологічними центрами світу з використанням повних комплектів доступних на момент розрахунків даних спостережень з різних платформ, у тому числі даних, що надходять у затриманому режимі. Проект реаналізу (Reanalysis Project) включає відновлення метеорологічних характеристик атмосфери з використанням поверхневих контактних спостережень на суші та в океані, радіозондових спостережень, літакових, супутникових та інших даних, методів використання та управління якістю цієї інформації, що зберігається за період з 1957 р. по теперішній час [8]. Пізніше період було збільшено з 1950 р. до поточного року. Повторний аналіз виконується в NCEP (Національний центр США прогнозу навколишнього середовища) з використанням глобальної спектральної моделі T62 (горизонтальна роздільна здатність чисельної сітки — 209 км) на 28 вертикальних рівнях. Ця ж модель використовується в NCEP в оперативній практиці, починаючи з грудня 1994 р. Модель має 5 рівнів у межах прибережного шару атмосфери та до 7 рівнів на висотах над ізобарою 100 гПа [9]. Модель включає параметризацію всіх головних фізичних процесів, у тому числі великомасштабну конвекцію, великомасштабні опади, дрібномасштабну конвекцію, розповсюдження гравітаційних хвиль, радіацію з добовим циклом при врахуванні хмарності, фізику прибережного шару атмосфери, гідрологію поверхневих вод суші, вертикальні та горизонтальні процеси дифузії.

Протягом багатьох років досліджень безперервно продовжується вдосконалення моделі нового Реаналізу даних клімату Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), що оновлює дані, зібрані та проаналізовані в попередніх базах даних (БД). База метеорологічних даних ERA5 — це п'яте покоління атмосферних моделей Реаналізів глобального клімату ECMWF, яке почалося з повторних аналізів, проведених у 1980-х роках, після яких були створені БД ERA-15, ERA-40 та ERA-Inter з різною структурою організації та зберігання даних [10]. ERA5 створена з використанням прогнозів високої роздільної здатності (HRES) з горизонтальною роздільною здатністю

31 км і охоплює період із січня 1950 р. майже до поточної дати. Об'єктивно проаналізовані метеорологічні та аеросиноптичні дані інтерполюються у вузли регулярної сітки по горизонталі та на 38 ізобаричних / 138 модельних рівні по вертикалі до ізобари 1 гПа. Окремо представлені двомірні дані на поверхні землі та на рівнях 2, 10 та 100 м, як характеристики прибережного шару атмосфери.

Нині таку інформацію можна отримати, використовуючи результати проекту повторного аналізу даних міжнародної метеорологічної мережі ERA-Interim/land або ERA-40 (глобальний атмосферний реаналіз з 1979 р. до сьогодні), який постійно оновлюється в реальному часі. Система асиміляції даних, що використовується для створення ERA-Interim, заснована на інтегрованій системі прогнозування (Integrated Forecasting System, IFS) версії Cy31r2 2006 [11]. Система використовує чотиривимірний варіаційний аналіз (4D-Var), що виконується на кількох часових кроках між початковим часом та часом майбутнього прогнозу. Спостереження враховуються як у їх просторовому, так і в часовому розподілі. Просторова роздільна здатність набору даних становить приблизно 80 км по горизонталі на 60 вертикальних рівнях від земної поверхні до 0,1 гПа [12]. Кожен новий варіант реаналізу заснований на інформації, що надається системою асиміляції даних (модель та аналіз), а також на зовнішній інформації зі спостережень та граничних умов. Для цього було використано різноманітні джерела метеорологічних спостережень, зокрема радіозонди, повітряні кулі, літаки, буї, супутники. Ці дані були використані під час розрахунків з використанням моделі чисельного прогнозу погоди ECMWF, яка є однією з найбільш визнаних у світі. Дані розрахунків зберігаються у форматі GRIB. Повторний аналіз було зроблено з метою підвищення точності історичних карт погоди та надання допомоги в більш детальному аналізі різноманітних метеорологічних даних за період, для якого спочатку були відсутні результати чисельного моделювання погоди.

Оскільки в контексті повторного аналізу асиміляція даних застосовується з мінімальними змінами за цей період, продукти повторного аналізу найбільше підходять для досліджень архівних даних. Дані реаналізу є вхідною інформацією для чисельної моделі прогнозу погоди США WRF-ARW (актуальна версія моделі V3.9.1). Модель на сьогодні підготовлена для проведення серії розрахунків із використанням різних схем параметризації фізичних процесів, включаючи моделювання прибережного атмосферно-

го шару з характеристиками вертикального профілю вітру, температури й турбулентності. З використанням програмного засобу WRF-portal для модельних розрахунків обрано територію України з описом розрахункової сітки у відповідній системі координат (крок сітки — 10 км, кількість точок по горизонталі — 247×211 , використовуються інтерпольовані наземні дані, такі як рельєф місцевості, типи землекористування та ґрунтів із роздільною здатністю 30 с).

Починаючи з січня 2016 р., ECMWF впровадив значне оновлення роздільної здатності з номінальним кроком сітки 9 кілометрів (0,08 градуса) та методологію для прогнозів із високою роздільною здатністю (HRES) та ансамблевих прогнозів (ENS) при суттєвому підвищенні ефективності розрахунків.

Аналіз метеорологічних умов у періоди лісових пожеж 2015, 2018, 2020 та 2022 рр. та пилової бурі 2020 р.

Для вибраних періодів з екстремальними явищами — пожежами та пиловими бурями — проведено опис синоптичних умов із використанням карт аналізу та прогнозу погоди [13–16], представлених на сайті (http://www1.wetter3.de/archiv_gfs_dt.html). Додатково використовувалися дані архіву метеорологічних спостережень [16] та радіозондування Вайомінгського університету [15]. Дані були статистично опрацьовані та представлені у вигляді комплексного опису синоптичних ситуацій.

Пилова буря 16–17 квітня 2020 р. у Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ). Пилові бурі в Київській, Чернігівській та Житомирській областях, які спостерігалися 16–17 квітня 2020 р., були зафіксовані метеорологічними службами України та Білорусі. Екстремальні погодні явища сформувалися синоптичною ситуацією, що склалася на півночі території Європи за 12-годинний період і представлена на рис. 1 відповідно до архівних даних Метеорологічної служби Німеччини (DWD) [13, 14].

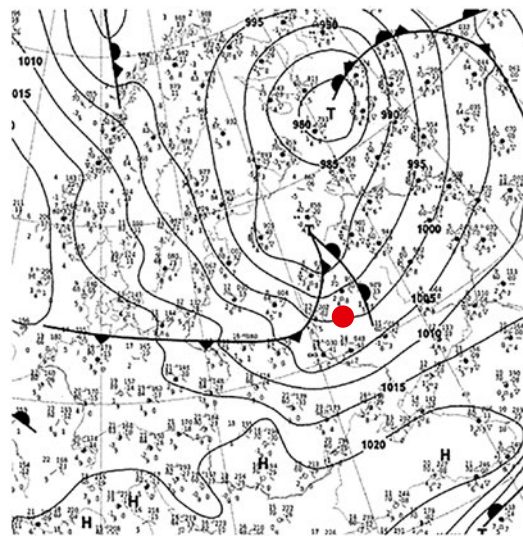
Погодні умови визначалися двома сполученими циклонами (Zn) приблизно однакової інтенсивності із загальними замкнутими ізобарами (985 гПа). Унаслідок адвекції холодного повітря, що розповсюджувалося з північного заходу, і холодного фронту, що утворився, два циклони, здійснюючи рух один щодо одного проти годинникової стрілки в східному напрямку, утворили більш глибокий центр циклону з ізобарою в 980 гПа та улоговину із замкнутою ізобарою в 990 гПа (див. рис. 1). Лінія холодного фронту

простяглася через усю східну Європу і переміщалася з північного заходу на південний схід. На території України холодний фронт 16 квітня о 12:00 проходив лінією через Овруч, Чорнобиль і далі до Брагіна (Білорусь), а 16 квітня о 15:00 фронт перемістився і проходив через Коростень, Київ, Чернігів, Ніжин та Семенівку. Проходження фронту супроводжувалося системою хмар середнього ярусу (шаруваті, шарувато-купчасті), характерною для холодних фронтів II роду [18]. Згідно з даними радіозондування атмосфери в пунктах Києва та Гомеля [15], швидкість вітру була до 15–22 м/с у приземному шарі атмосфери та з висотою зростала, досягаючи 30–40 м/с. Особливістю холодних фронтів другого роду є передфронтальні шквали. Оскільки в передній частині холодного клина завдяки тертю створюється крутий нахил фронтальної поверхні, частина холодного повітря опиняється над теплим. Далі відбувається «обвалення» вниз холодних повітряних мас у передній частині холодного валу, що рухається. Обвалення холодного повітря призводить до витіснення вгору теплого повітря і виникнення уздовж фронту вихору з горизонтальною віссю. У цих умовах проходження холодного фронту супроводжується руйнівними швидкостями вітру [18, 19]. Швидкість вітру часто перевищує 15–20 м/с. За умов великої сухості та відносної стійкості передфронтального повітря холодний фронт 16–17 квітня проходив переважно без опадів та в умовах погано вираженої системи фронтальних хмар, за винятком Чернігівської області (Семенівка), де спостерігалися зливові опади 16 квітня протягом двох термінів спостережень (15 та 18 год).

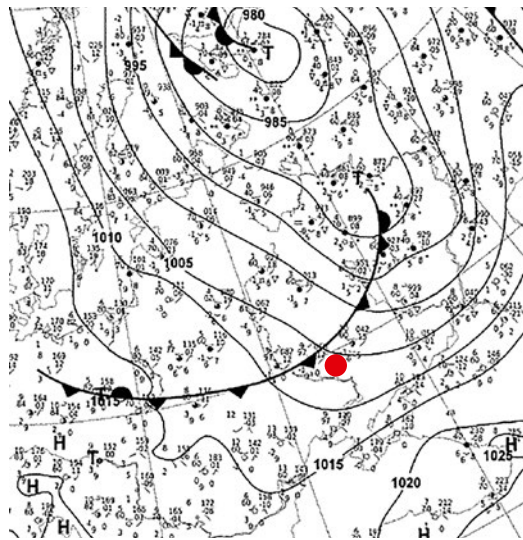
Циклон, що сформувався, простягався вгору до висоти 6 км і в своїй тилової частині по всій товщині характеризувався північно-західним напрямком вітру за період з 16 по 17 квітня 2020 р. Висота примежевого шару атмосфери, що змінювалася від 1 000 м у нічний час до 1 800–2 400 м вдень, характеризує інтенсивні процеси турбулентного перемішування в термобаричному полі холодного фронту, який проходив у вказаний період на півночі України.

Комплексно опрацьована інформація із залученням даних наземних спостережень, даних чисельного аналізу елементів погоди та даних проекту AERONET (AErosol RObotic NETwork, <https://aeronet.gsfc.nasa.gov>) представлена на рис. 2.

Проходження фронту супроводжувалося сильними вітрами з поривами до 20–22 м/с (Чернігів, Семенівка, Брагін, Гомель) та атмосферними явищами, зафіксованими з 12:00 16 квітня на метеорологічних станціях у пунктах спостережень [16] (табл. 1).



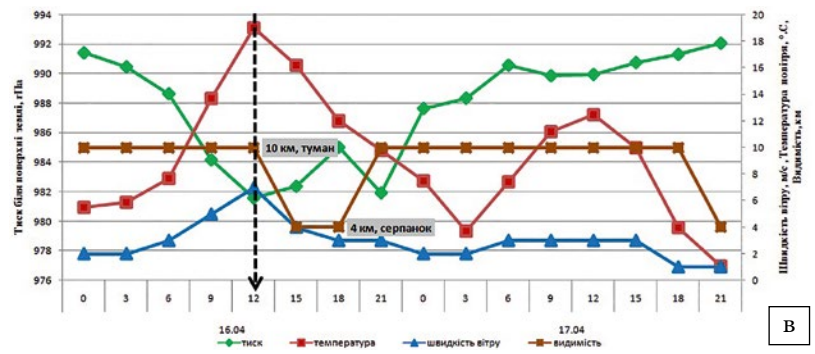
а



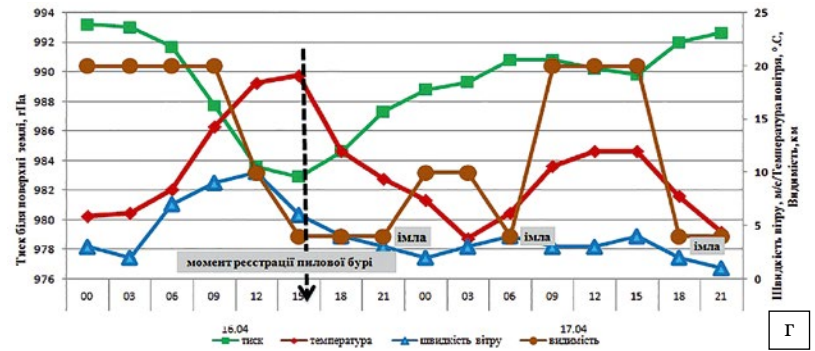
б

Рис. 1. Карты приземного тиску (гПа) та положення ліній фронтів за архівними даними [13–16]: 16.04.2020 р. о 12:00 (а); 17.04.2020 р. о 00:00 (б); динаміка швидкості вітру, температури повітря біля землі, приземного тиску та дальності видимості в період пилової бурі 16–17 квітня 2020 р. в Чорнобилі (в), Києві (г), Брагині (д) та Овручі (е).

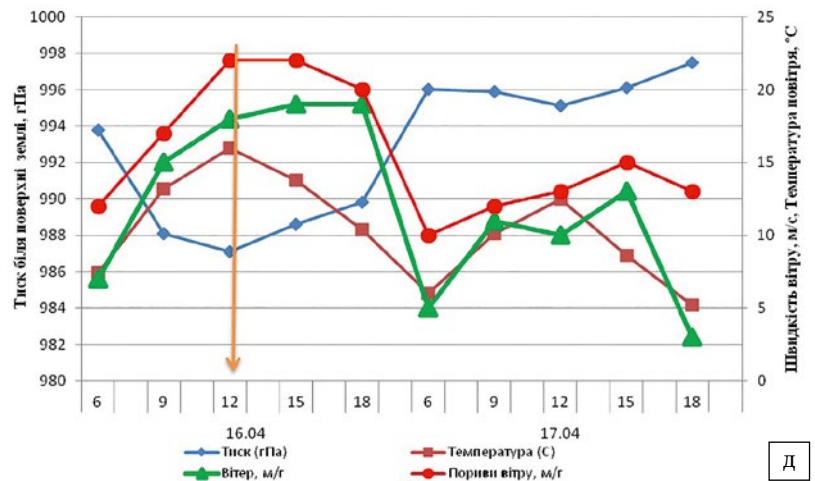
Позначення: — холодний фронт, — ЧАЕС



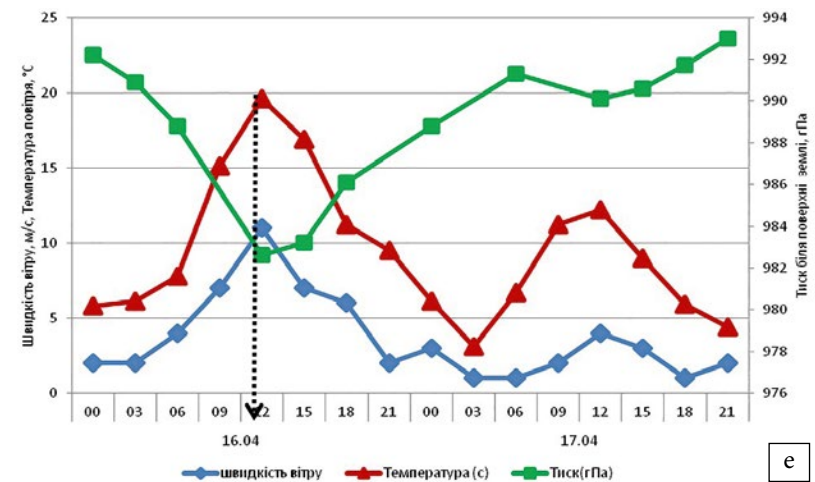
в



г



д



е

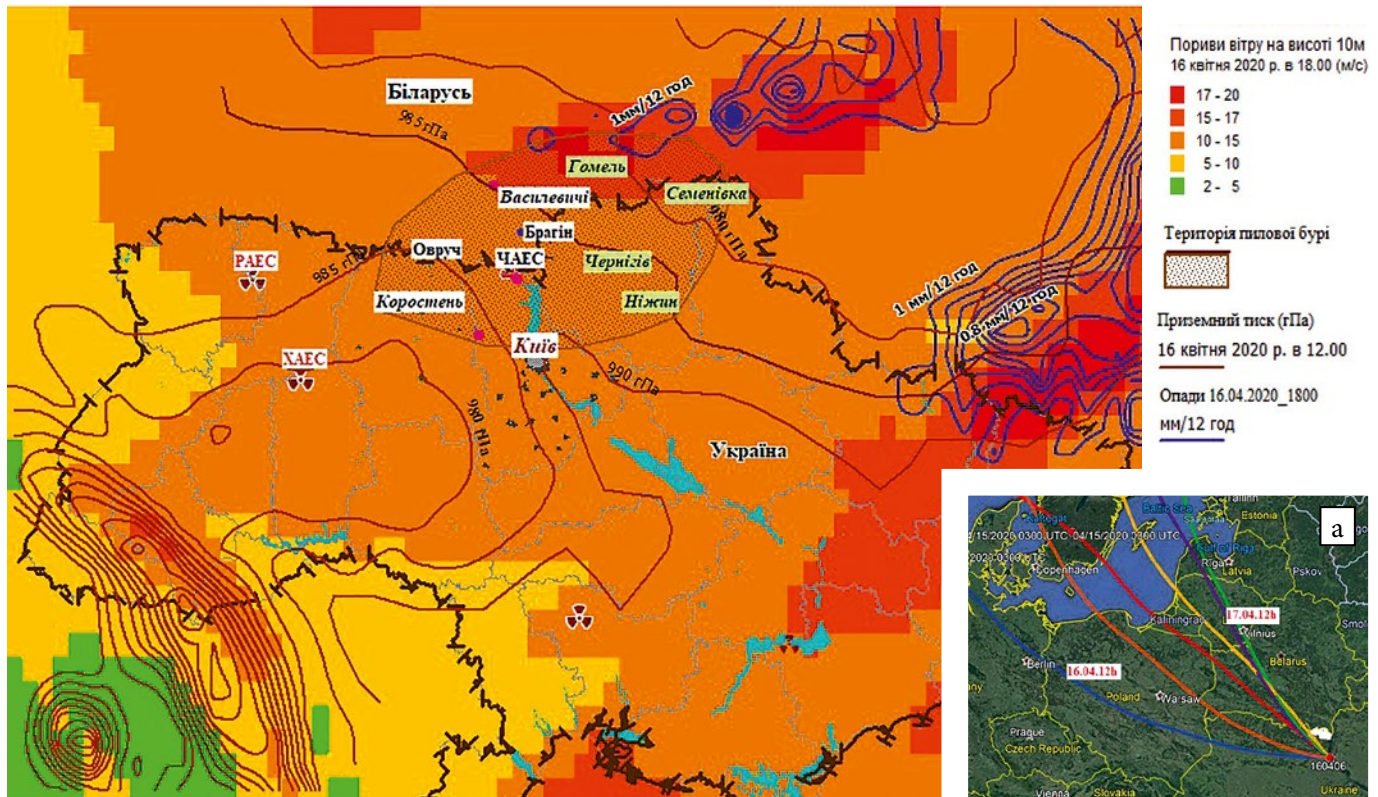


Рис. 2. Приземна карта окремих елементів погоди (приземний тиск, опади та пориви вітру) з територією пилової бурі; а — траєкторії циклону на висоті 1 000 гПа за 16–17 березня 2020 р. (дані AERONET через 6 год)

Таблиця 1. Видимість та атмосферні явища під час проходження холодного фронту II роду 16–17 квітня 2020 р. згідно з даними метеостанцій на півночі України

Час спостережень		Чорнобиль		Київ		Вишгород		Овруч	
Дата	UTC	Вид	Яв	Вид	Яв	Вид	Яв	Вид	Яв
16.04.2020 р.	12	10	—	10	імла	2	імла (туман)	10	—
	15	4	серпанок (туман)	4	пилова буря	4	імла (туман)	4	дим
	18	4	серпанок (туман)	4	імла	10	туман	4	дим
	21	10	туман	4	імла	10	—	10	—
17.04.2020 р.	0	10	туман	10	пиловий поземок	10	—	10	—
	3	10	—	10	—	10	—	10	—
	6	10	—	4	імла	4	дим	10	—
	9	10	—	20	—	4	дим	10	—
	12	10	—	20	—	10	—	10	—
	15	10	—	20	—	10	—	4	дим
	18	10	—	4	імла	10	дим	1	дим
	21	4	серпанок (туман)	4	імла	10	дим	2	дим

Примітка: UTC — Coordinated Universal Time (універсальний координований час), год; Вид — дальність видимості в км; Яв — атмосферне явище.

Як очевидно з табл. 1, починаючи з 12:00 16 квітня метеорологічними станціями фіксувалися екстремальні погодні ситуації (туман, серпанок, пилова буря, перенесення диму), які супроводжувалися погіршенням видимості та сильним вітром зі швидкістю до 22 м/с.

Слід зазначити, що проходження холодного фронту II роду з високими швидкостями вітру над великою урбанізованою територією (м. Київ) та розораною в цей час сільськогосподарською територією Житомирської області (м. Овруч) узгоджується в часі з погіршенням видимості. В Овручі це пов'язано з перенесенням диму від лісових пожеж, що відновилися в цей час у радіусі 10–25 км, а в Києві — з перенесенням пилу від розораних до посіву територій і продуктів горіння лісових пожеж, що пройшли з 3 по 14 квітня в ЧЗВ та за її межами. Протягом 36 год метеостанції населених пунктів Овруч, Чорнобиль, Київ, Вишгород, Чернігів, Сновськ, Ніжин, Семенівка фіксували атмосферні явища, пов'язані з перенесенням диму, пилу, дрібного піску та погіршенням видимості до 1–2 км (імла, пиловий поземок, пилова буря).

Результати наземних спостережень підтверджуються даними вимірювань автоматизованих глобальних незалежних служб: SaveEcoBot [20], AERONET [21], представлених на рис. 3 і 4. Дані SaveEcoBot (див. рис. 3) за PM10 (показує вміст пилових частинок у повітрі від 10 мкм і менше) демонструють, що вміст пилових частинок у період пилової бурі 16–17 квітня 2020 р. в Києві в 5 разів перевищив гранично допустиму концентрацію (ГДК = 300 мкг/м³) для максимально допустимої разової концентрації і в 250 разів середньодобові значення (ГДК = 60 мкг/м³).

Дані мережі AERONET використовуються для оцінки пилового аерозолю за допомогою параметра AOD (Aerosol Optical Depth — аерозольної оптичної товщини) у спектральній ділянці яскравості Сонця 870 нм. Високі значення AOD (від 0,5 до 2,0 і вище) ідентифікуються з грубодисперсним пиловим аерозолем [22–25], що показано на рис. 4 (за даними [26]). Згідно з цими даними, у період пилової бурі в Українському Поліссі інтенсивність прямої сонячної радіації за рахунок присутності пилу в атмосфері короткочасно знижувалась більш ніж у 8 разів.

Таким чином, комплексний аналіз даних спостережень наземних метеостанцій та глобальних мереж дослідження стану атмосферного повітря підтверджують існування інтенсивної короткострокової пилової бурі на радіоактивно забрудненій території ЧЗВ у квітні 2020 р.

Метеорологічні умови протягом часу існування пожеж 2015, 2018, 2020 та 2022 рр. Дослідження та прогноз поширення радіоактивних речовин від лісових та торф'яних пожеж на радіоактивно забрудненій території ЧЗВ можуть бути виконані завдяки використанню моделей атмосферного перенесення радіонуклідів. Просторово-часова мінливість концентрацій речовин в атмосфері залежить від синоптичної ситуації, яка визначається цілою низкою метеорологічних факторів — швидкістю та напрямком повітряного потоку на різних висотах, температурою навколишнього повітря біля землі та в приземному шарі атмосфери, вологістю атмосфери [18–19].

Розглянемо синоптичні ситуації, що визначали перерозподіл забруднюючих речовин в атмосфері та по

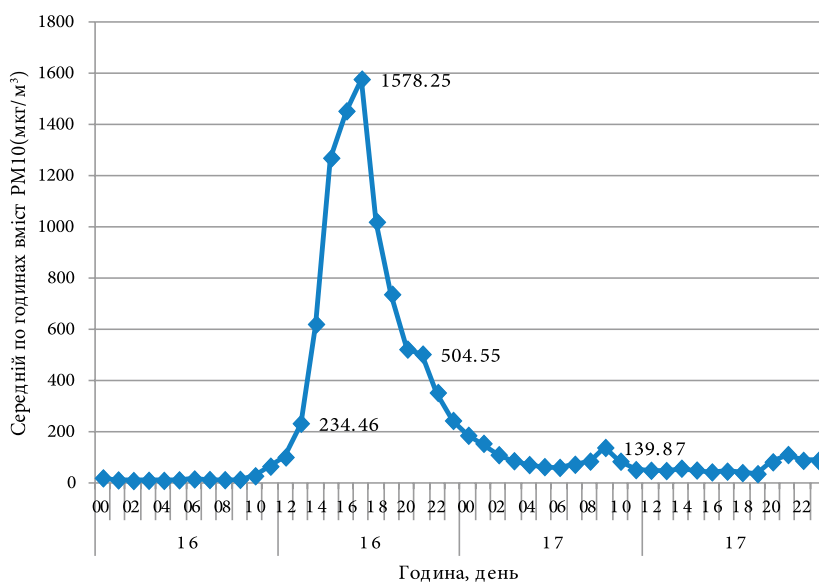


Рис. 3. Вміст PM10 (середній по годинах) у приземному повітрі в Києві 16–17 квітня 2020 р. (мкг/м³)

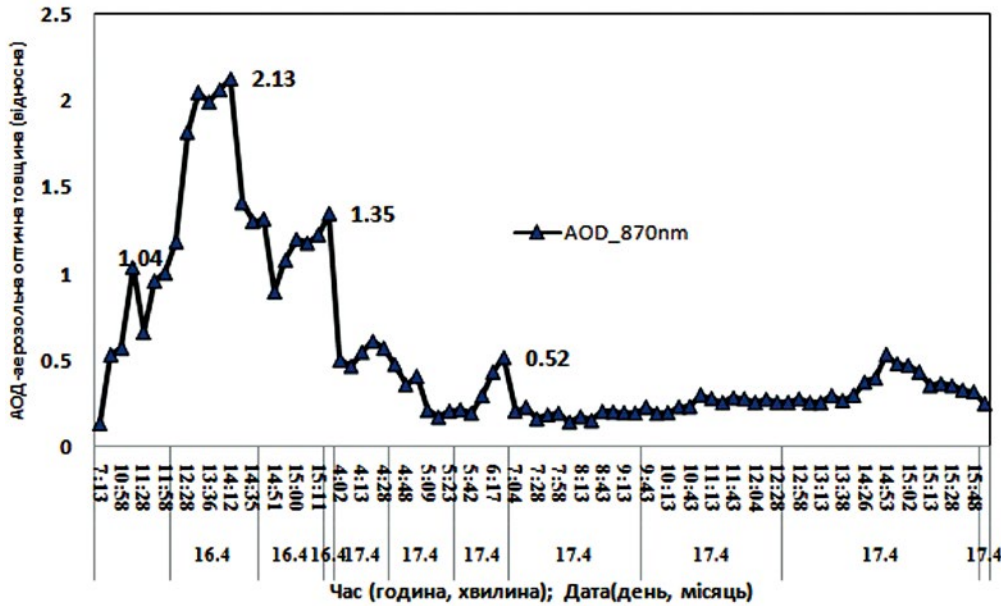


Рис. 4. Значення AOD у спектральній ділянці яскравості Сонця 870 нм (відносна величина)

території ЧЗВ за періоди пожеж 2015, 2018, 2020 та 2022 рр. Опис синоптичних ситуацій та використання аеросиноптичних даних для чисельних розрахунків атмосферного перенесення продуктів горіння за періоди пожеж проводилося з використанням таких наборів:

- даних наземних спостережень метеорологічної мережі України — пункт спостережень — м. Чорнобиль [16];
- даних радіозондування м. Київ (University of Wyoming Sounding Map [15]);

- даних Проекту реаналізу, представлених у вигляді Бази даних ERA5, результатів чисельного прогнозу погоди, виконаних за моделлю США WRF [17, 27] для двох наборів даних: погодинні дані на стандартних ізобаричних рівнях з 1979 р. по теперішній час та погодинних даних для прибережного шару атмосфери з 1979 р. донині;

- архіву синоптичних карт приземного тиску та топографії AT500 для Європейської території для періоду пожеж 5–8 червня 2018 р. [13, 14].

Період пожеж 2015 р. За 2015 р. розглянуто 3 періоди пожеж: 1) з 26 квітня по 3 травня; 2) з 29 червня по 2 липня; 3) з 8 по 11 серпня. Опишемо коротко метеорологічні умови в зазначені періоди пожеж.

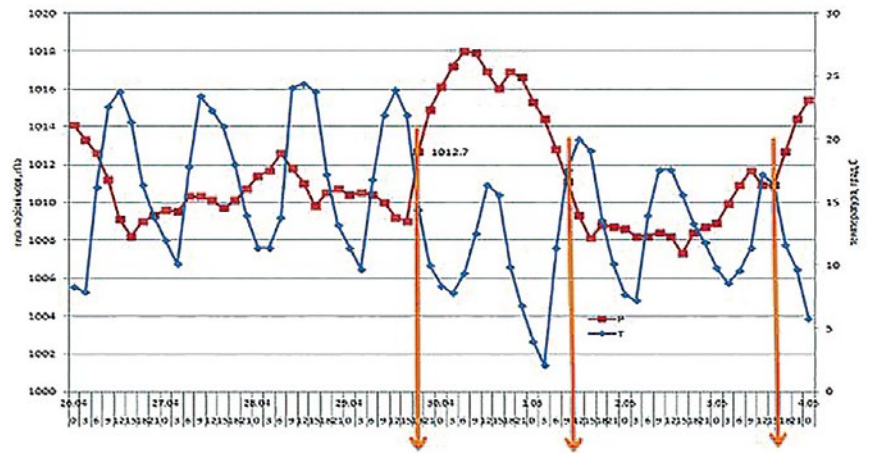
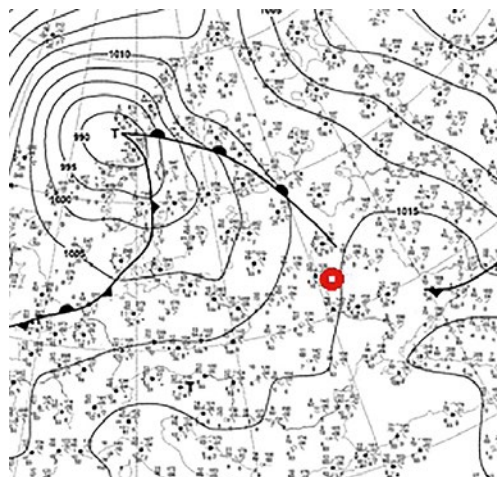
Періоди пожеж 2015 р. характеризувалися трьома типовими синоптичними ситуаціями: теплим сектором циклону (рис. 5, а), малоградієнтним баричним полем за типом високого тиску (рис. 5, б) та периферією антициклону (рис. 5, в) відповідно.

Динаміка змін метеоелементів (температури та тиску повітря) за основні терміни спостережень у період із 26.04 по 03.05.2015 р., представлена на

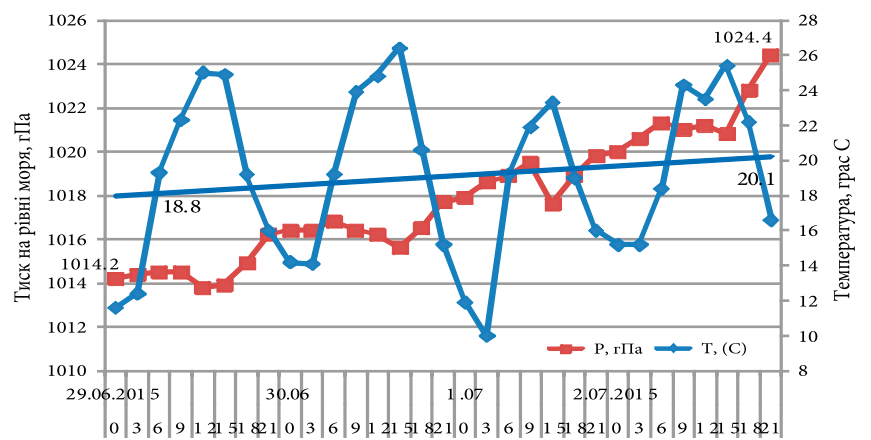
рис. 5, а, показує, що з 18:00 29 квітня відбулася різка короткочасна зміна погодних умов — перебудова баричного поля з циклонального на антициклональне, що супроводжувалося адвекцією холоду, а напрямок перенесення повітряних мас змінився з південного на північний. Але вже починаючи з 9:00 1 травня, територія ЧЗВ потрапила під вплив новоствореного циклону на тлі розмитого баричного поля.

Періоди пожеж у липні та серпні 2015 р. характеризувалися типовим ходом зміни тиску (зниження або підвищення тиску) та температури, що відповідає добовому для цього сезону з амплітудою температури у середньому від 10° до 13° (рис. 5, б, в). Швидкість вітру змінювалася від значень 1–2 м/с на висоті 10 м над землею до 10–15 м/с на верхній границі прибережного шару атмосфери (до 500–1 000 м у нічний час). У цей час року вночі спостерігалася приземна інверсія температури до висоти 500 м. Добовий перебіг зміни відносної вологості був стандартним.

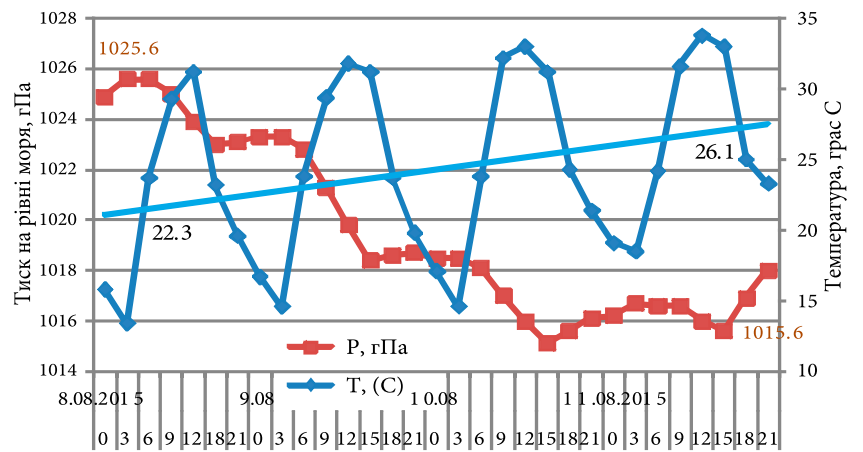
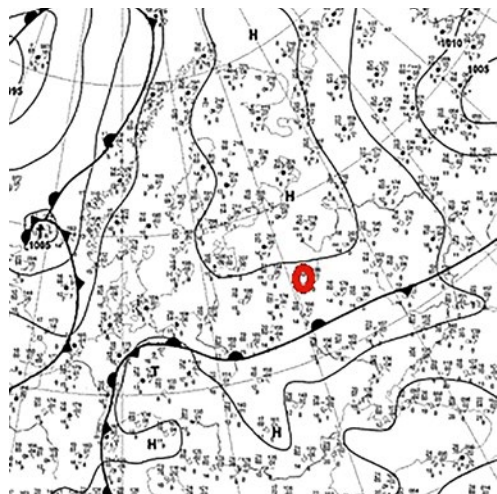
Період пожеж 5–8 червня 2018 р. Результати аналізу синоптичної ситуації під час пожеж на території ЧЗВ 5–8 червня 2018 р. представлені на рис. 6 та 7. Використовувалися дані метеорологічних та аерологічних спостережень за зазначений період на ст. Чорнобиль та ст. Київ. Для характеристики синоптичної ситуації використовувалися карти приземного тиску, що представлені на рис. 6. Протягом чотирьох діб, що розглядалися, над територією України спостерігалася типова синоптична ситуація, при якій територія ЧЗВ знаходилася в області південно-західного сектора тилової частини циклону, розташованого на північному сході Європей-



а



б



в

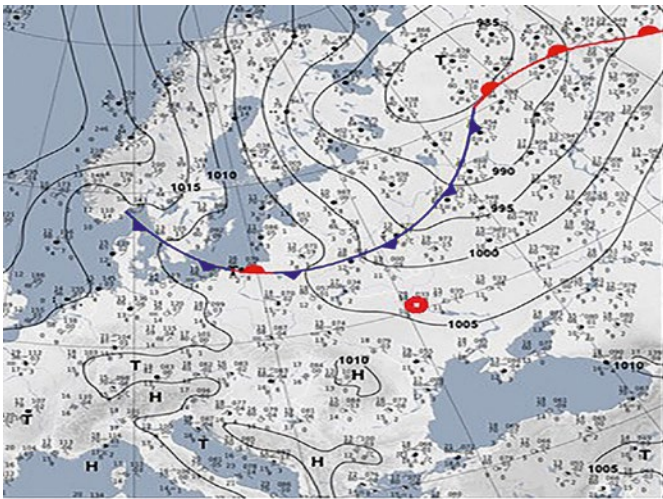
Рис. 5. Типові синоптичні ситуації та динаміка метеоелементів (температури та тиску) у періоди лісових пожеж у ЧЗВ у 2015 р.: а — типова ситуація з теплим сектором циклону (26.04–03.05); б — розмите баричне поле високого тиску (29.06–02.07); в — південна периферія антициклону (08.08–11.08)

ської території (рис. 6, а). Після проходження холодного фронту 6 червня зі зростанням атмосферного тиску сформувався нефронтальний антициклон 8 червня із центром над територією України та Білорусі (рис. 6, б). Переважна північна та північно-західна атмосферна циркуляція, слабкий вітер і штиль із приземною температурною інверсією в нічний час зумовлювали забруднення атмосферного повітря біля землі [19, 22, 23].

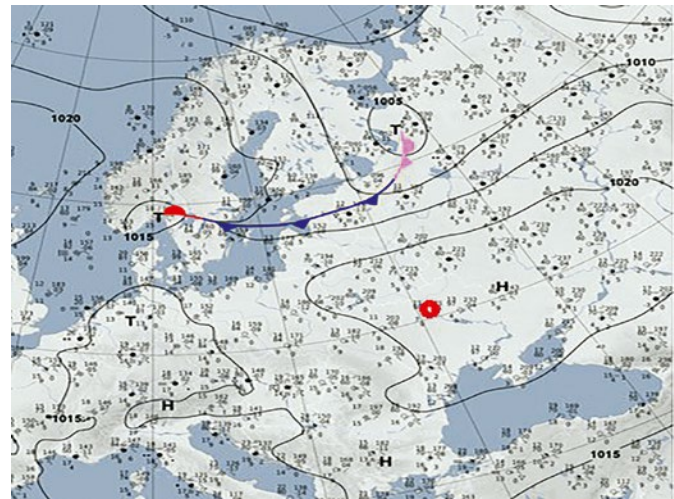
Додатково до наявних метеорологічних даних для повноцінного аналізу синоптичної ситуації використовувалися дані радіозондування (аерологічні дані) атмосфери, які дозволили визначити особливості по-

годних умов: наявність або відсутність температурних інверсій, поворот вітру на висотах тощо. В аналізованій період 5–8 червня 2018 р. у нічний час фіксувалася приземна інверсія температури до 500 м, що супроводжувалося збільшенням забруднення приземного повітря.

Період пожеж 4–22 квітня 2020 р. За результатами аналізу приземних синоптичних карт, характеристик динаміки приземного тиску та температури, а також напрямків перенесення повітряних мас метеорологічні умови пожеж у ЧЗВ для періоду з 4 по 22 квітня 2020 р. були систематизовані у 6 типових синоптичних ситуацій, представлених на рис. 8.



а



б

Рис. 6. Синоптична ситуація в період пожежі 5–8 червня 2018 р.: а — 5 червня 00:00, б — 8 червня 00:00

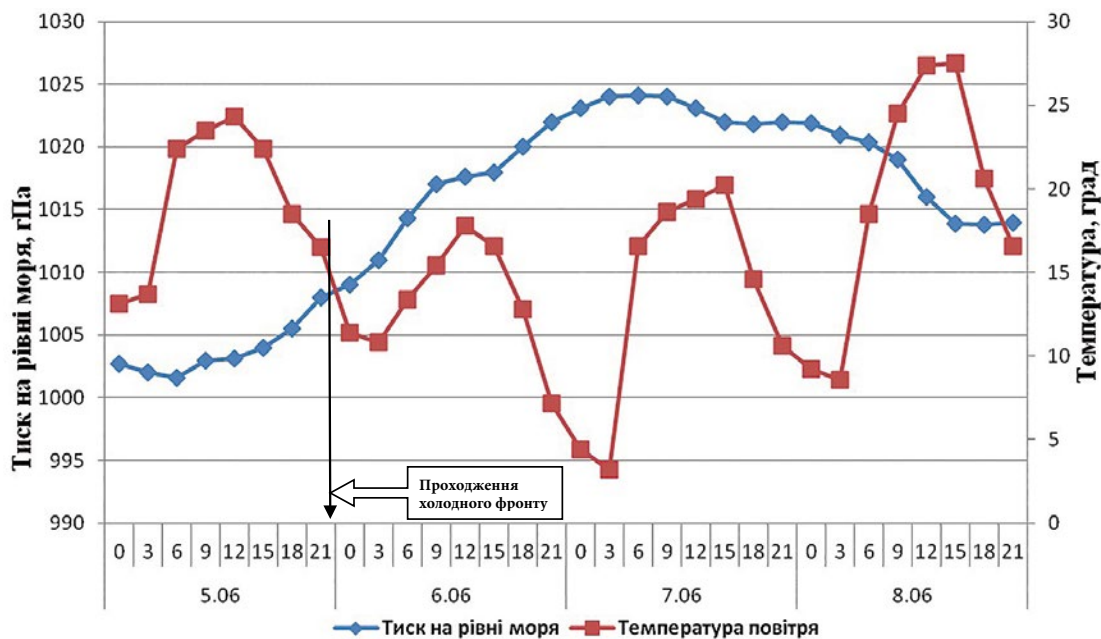
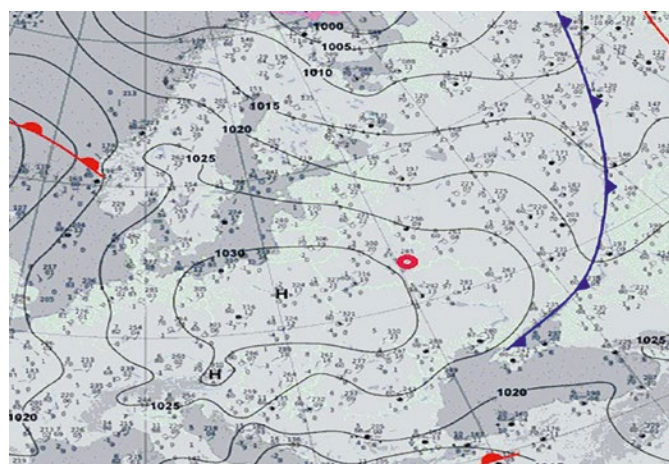
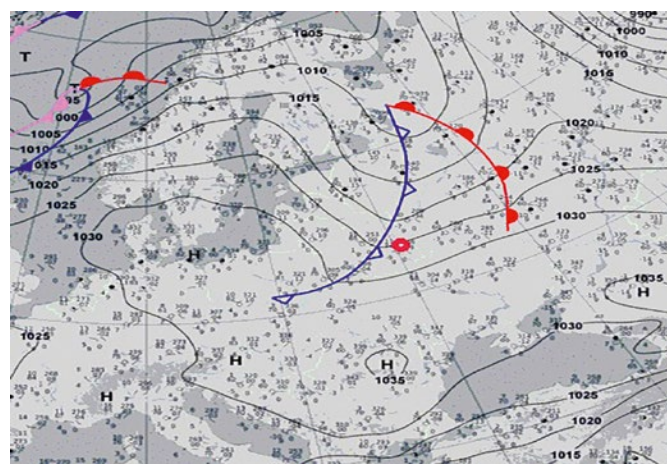


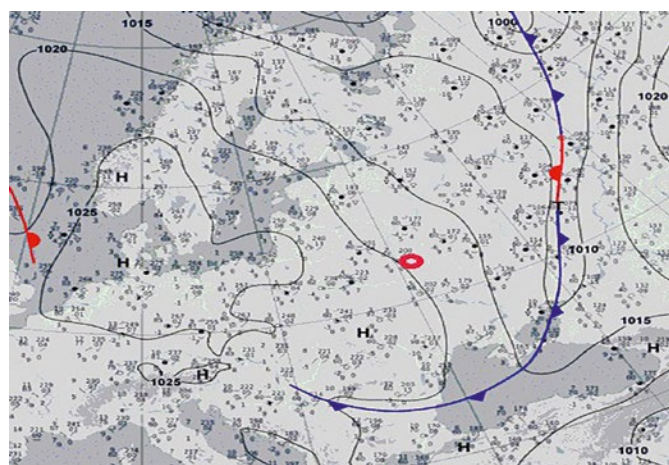
Рис. 7. Динаміка температури та тиску за наземними даними ст. Чорнобиль



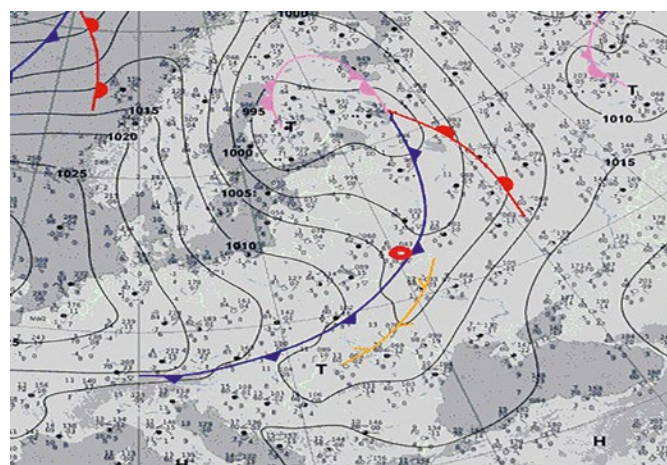
I — Північно-східна та східна периферія антициклону (4–7 квітня 2020 р.)



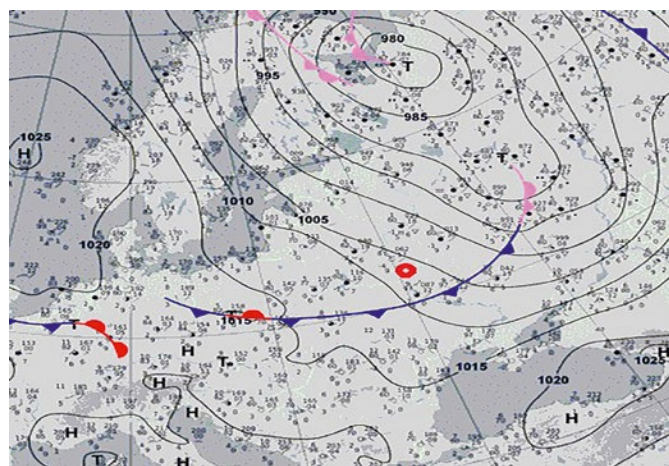
II — Тилова частина циклону, на холодному фронті (8–10 квітня 2020 р.)



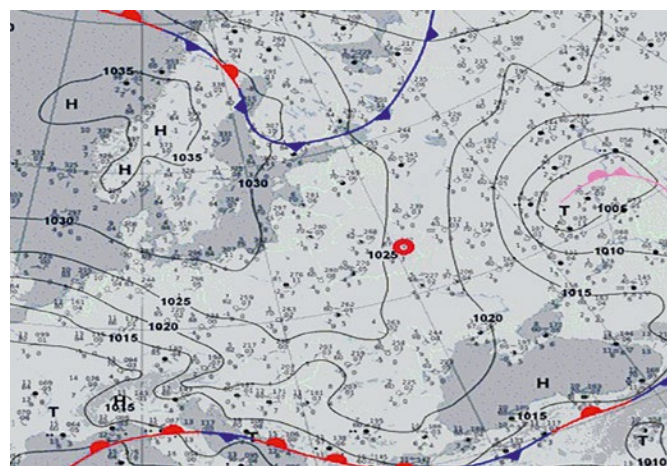
III — Розмите поле високого тиску із північно-західним переносом (10–12 квітня 2020 р.)



IV — Периферія теплого сектора за холодним фронті із північно-західним переносом (12–14 квітня 2020 р.)



V — Периферія тилової частини циклону (14–16 квітня 2020 р.)



VI — Східна та південно-східна периферія антициклону (16–22 квітня 2020 р.)

Рис. 8. Виділені типові синоптичні ситуації (I–VI) для періоду пожеж у ЧЗВ з 4 до 22 квітня 2020 р. Динаміка температури та тиску по ст. Чорнобиль із поділом на періоди типових синоптичних ситуацій

Усі виділені типові синоптичні ситуації, що представлені на рис. 8, визначили динаміку змін тиску та температури повітря біля поверхні землі (рис. 9) та вертикальний розподіл градієнта температури та швидкості вітру в примежевому шарі атмосфери. Вертикальний розподіл температури повітря в примежевому шарі атмосфери за період із 4 до 22 квітня переважно характеризується нічною приземною інверсією товщиною 200–300 м, пов'язаною з охолодженням приземного шару повітря від підстильної поверхні. Вдень такі інверсії руйнуються. У разі сильних швидкостей вітру спостерігався стандартний вертикальний хід температури — монотонне зменшення температури повітря з висотою з невеликою ізотермією за товщиною в приземному шарі атмосфери.

Період пожеж 16–29 березня 2022 р. Лісові пожежі в період з 16 по 29 березня 2022 р. по території ЧЗВ супроводжувалися метеорологічними умовами, які можна представити у вигляді двох типових синоптичних ситуацій:

1) з 11 по 23 березня *антициклональної*, за якої погодні умови визначалися антициклональним баричним полем високого тиску з малими швидкостями вітру переважно західного, північно-західного та північного напрямків вітру (80 %) з ясною та сухою погодою та з поступовим сезонним підви-

щенням температури повітря (рис. 10). Представлені синоптичні карти відображають положення ЧЗВ відносно центру поля високого тиску (Н), при якому зона перебувала у його центральній або східній частинах. 21 березня 2022 р. на східній околиці антициклон примикав до області низького тиску, а погодні умови супроводжувалися підвищеними горизонтальними градієнтами тиску та швидкостями вітру.

2) з 24 по 29 березня *циклональної*, коли різка зміна погодних умов відбувалася за рахунок адвекції холодних мас повітря у всьому шарі атмосфери, що приходили на територію України з північного заходу та утворили холодний фронт. Швидкість вітру західного та північно-західного напрямків (повторюваність 70 %) у приземному шарі атмосфери досягала 15–22 м/с і зростала з висотою до 30–40 м/с (рис. 11). За даними метеостанцій м. Києва та м. Брагіна, 24 та 26 березня спостерігалися короткочасні зливи з інтенсивністю до 2 мм/12 год.

Детальна характеристика погодних умов у зоні лісових пожеж у зазначений період проводилася із залученням інформаційних ресурсів [13–16]. Було оцінено такі характеристики:

динаміка змін основних метеоелементів (температури повітря, тиску, швидкості вітру) за основні метеорологічні терміни спостережень (рис. 12) на те-

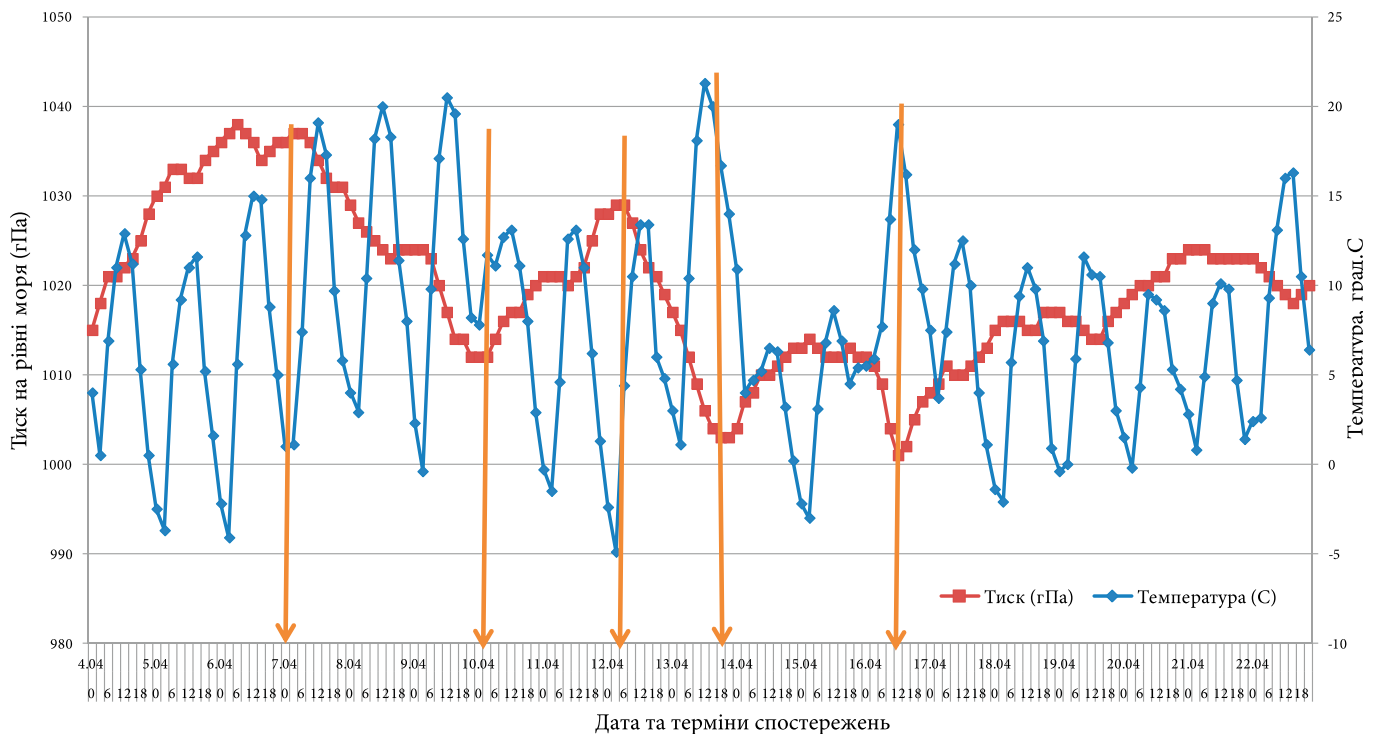


Рис. 9. Динаміка температури та тиску по ст. Чорнобиль із поділом на періоди типових синоптичних ситуацій

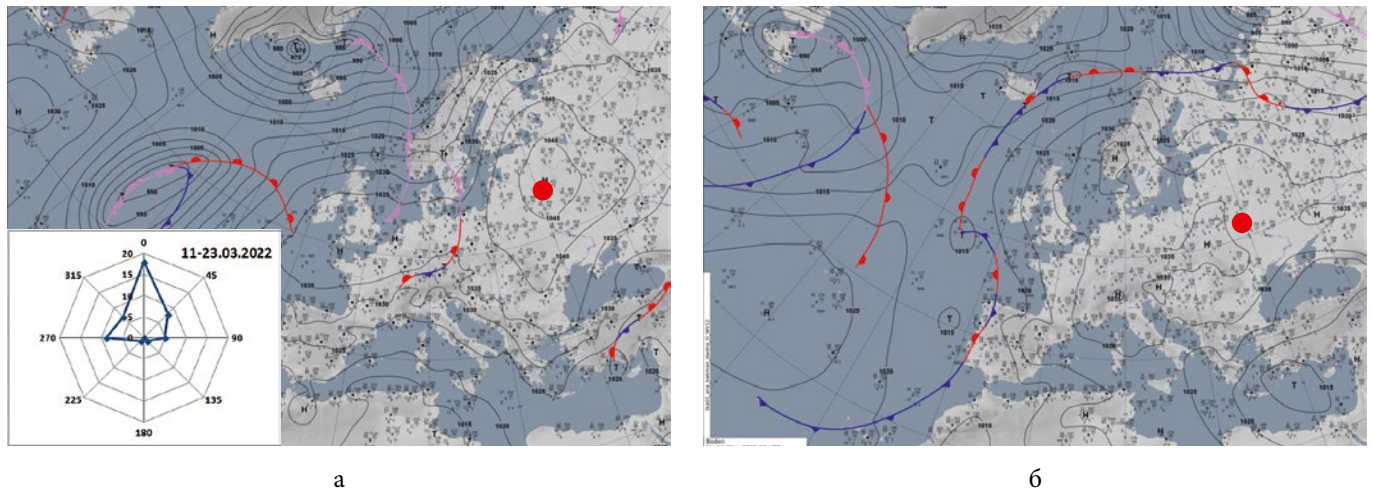


Рис. 10. Динаміка зміни синоптичної «антициклональної» ситуації з 18 березня (а) до 23 березня (б) 2022 р. з розою вітрів за період з 11 по 23 березня 2022 р. (● — ЧАЕС, Н — Hoch — високий тиск)

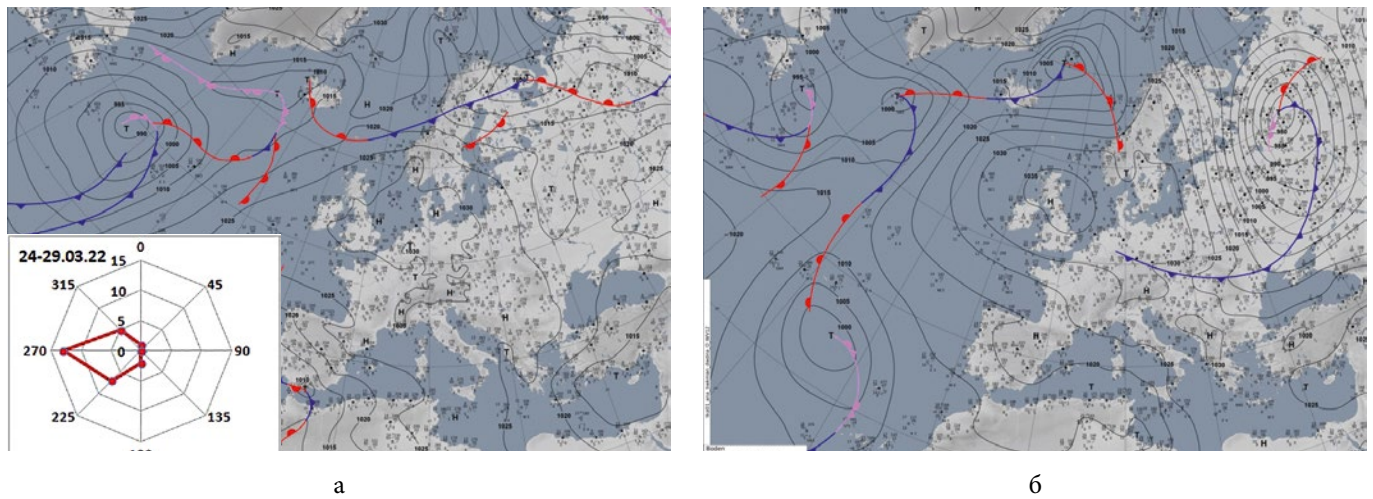


Рис. 11. Динаміка синоптичної «циклональної» ситуації з 24 березня (а) до 27 березня (б) 2022 р. з розою вітрів за період з 23 по 29 березня 2022 р. (Н — Hoch — високий тиск, Т — Tief — низький тиск)

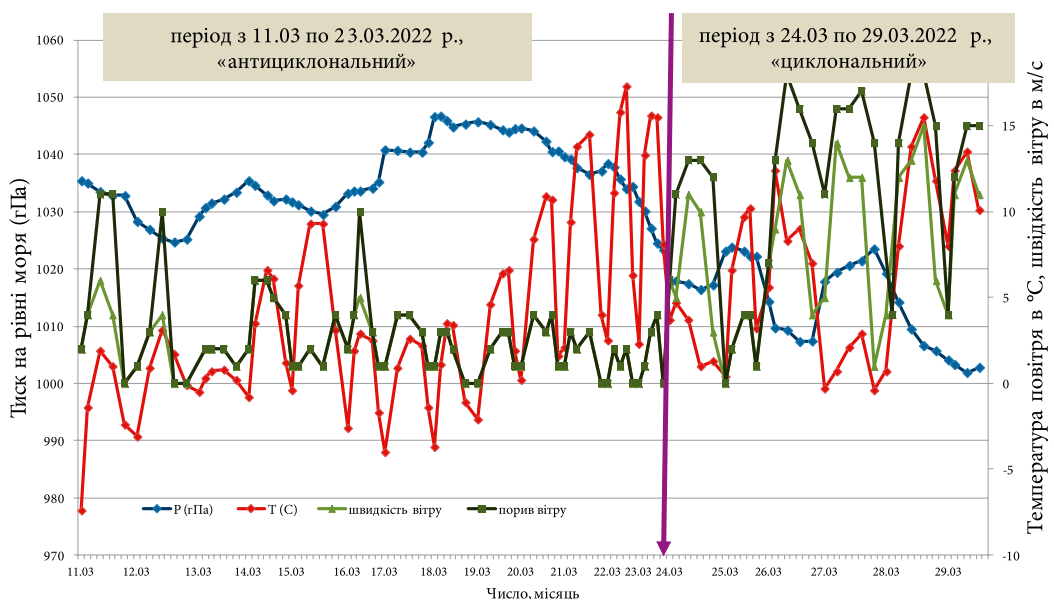


Рис. 12. Динаміка змін метеоелементів — температури, приземного тиску, середньої швидкості вітру та його поривів для ЧЗВ (використані дані найближчої метеостанції м. Брагін, внаслідок відсутності метеоданих у цей період у п. Чорнобиль)

риторії ЧЗВ із використанням даних із найближчої до Чорнобиля метеостанції м. Брагін (Білорусь);

вертикальні профілі температури та швидкості вітру в повітряних масах, що надходили на територію ЧЗВ;

просторова картина змін параметрів примежевого шару атмосфери (ПША) — висоти ПША та швидкості поривів вітру на території України (рис. 13).

Як видно з рис. 12, зміна синоптичної ситуації з антициклональної (11–23 березня) на циклональну (24–29 березня) супроводжувалася різким зниженням атмосферного тиску, зменшенням температури повітря та збільшенням швидкості вітру до 18–20 м/с. Протягом періоду з 11 по 23 березня 2022 р. для антициклональної ситуації атмосферний тиск коливався від 1 035 до 1 045 гПа, швидкість вітру змінювалася в діапазоні від 1 до 4 м/с, спостерігалася суха погода із сезонним підвищенням температури повітря від 2 до 15 °С вдень.

Проаналізовані дані радіозондування (профілі температури повітря та швидкості вітру) відображають стан примежевого шару атмосфери при антициклональній та циклональній ситуаціях. Формування приземних шарів інверсії для антициклональної ситуації відбувалося в основному в нічні години при невеликих швидкостях вітру в шарі завтовшки до 700–800 м. Швидкість вітру, як правило, в денні години збільшувалася до 8–9 м/с внаслідок прогрівання повітря та збільшення інтенсивності турбулентного перемішування мас.

Просторовий розподіл висоти примежевого шару атмосфери та швидкості вітру в денні години

(о 12 год) на території України за окремі дати для двох ситуацій представлено на рис. 13.

Подальший просторовий аналіз карт приземного поля тиску за циклональний період із 24 по 29 березня 2022 р. [13, 14] показує формування області низького тиску з центром над центральним Уралом (див. рис. 11, б). Характеристики часової динаміки основних метеоеlementів, наведених на рис. 12, підтверджують це — різке зниження приземного тиску і температури повітря, починаючи з 24.03.2022 р. Тиск знизився в середньому на 20 гПа в діапазоні від 1 022 гПа до 1 002 гПа. Примежевий шар атмосфери характеризувався вертикальними профілями температури із приземною інверсією товщиною до 100 м у нічні години та високими середніми швидкостями вітру біля землі до 10–20 м/с.

Холодний фронт, що проходив 26–27 березня 2022 р. (див. рис. 11, б) над територією ЧЗВ, різко змінив погодні умови. Просторовий розподіл показників ПША, представлений на рис. 13, б, показує область над ЧЗВ з підвищеними баричними градієнтами і високими швидкостями вітру з поривами, що досягали 20–22 м/с біля землі і до 30–40 м/с на висотах у денні години. Вузька смуга ПША з високими швидкостями вітру та великими значеннями висоти ПША, що досягали 3 000 м, простягалася з півночі на південь до Чорного моря відповідно до структури термобаричного поля, що сформувалося між двома баричними утвореннями низького та високого тиску. Перед проходженням холодного фронту 24 та 26 березня спостерігалися купчасті хмари та короткочасні зливи.

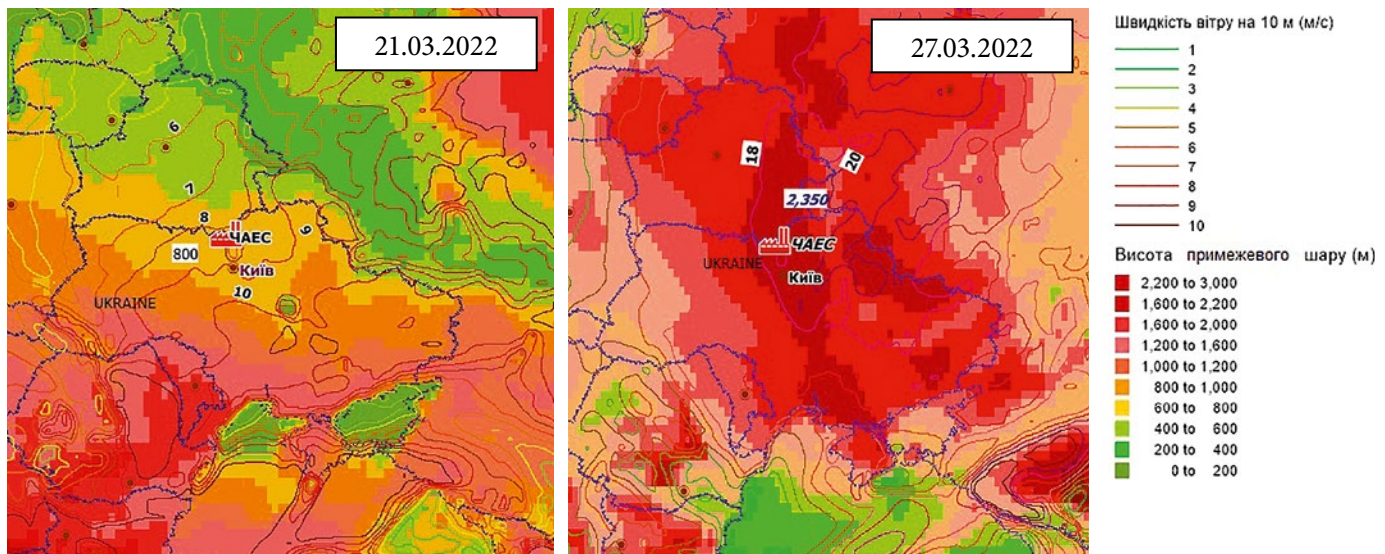


Рис. 13. Просторовий розподіл висоти примежевого шару атмосфери та швидкості поривів вітру в денні години (12:00 год) над територією України для антициклональної (а) та циклональної ситуацій (б)

Підготовка та систематизація прогностичної аеросиноптичної інформації за даними архіву Проекту реаналізу (ERA-Interim та ERA 5) для моделі атмосферного перенесення та осадження радіонуклідів

Моделювання аеросиноптичних умов у періоді лісових пожеж (2015, 2017, 2020 та 2022 рр.) та пилової бурі (16–17 квітня 2020 р.) для ЧЗВ було проведено з використанням двох джерел інформації [10, 28] архіву даних реаналізу ECMWF:

1) результатів розрахунку за чисельною моделлю прогнозу погоди WRF-ARW [29], розробленою в NCAR (National Center for Atmospheric Research), США, джерелом даних для якої є дані Проекту реаналізу 2 (Бази даних Interim ds627.0 та ERA5 ds633.0);

2) прогностичних даних (крок виведення даних за часом 1 год), отриманих у результаті розрахунків за глобальною моделлю GFS та оперативною моделлю Analysis ECMWF — дані ERA5 Copernicus [17, 27], представлені двома наборами даних:

погодинні дані ERA5 на рівні землі з 1979 р. до теперішнього часу [30];

погодинні дані ERA5 на різних ізобаричних поверхнях з 1979 р. до теперішнього часу [31].

Для розв'язання завдання перенесення та осадження радіоактивних речовин під час лісових пожеж у ЧЗВ на прилеглих територіях було організовано метеорологічне (аналіз або прогноз) забезпечення для математичного моделювання з використанням моделі атмосферного розповсюдження радіонуклідів LEDI, розробленої в ІПБ АЕС НАН України [32, 33]. Висхідні дані у вигляді метеорологічних полів за зазначені періоди були сформовані за блоками даних: 1) для ізобаричних поверхонь вільної атмосфери (1 000–100 гПа); 2) на поверхні землі та примежевого шару атмосфери.

Для метеозабезпечення прогностичними даними дифузійної моделі атмосферного перенесення та осадження радіонуклідів на підстильну поверхню LEDI використовуються результати розрахунку полів метеоелементів і характеристик примежевого шару атмосфери на різних часових кроках, отриманих за моделлю чисельного прогнозу погоди WRF-ARW. Аеросиноптична інформація, необхідна для розрахунків за моделлю атмосферного перенесення, підготовлена з використанням архіву даних атмосферного Реаналізу відкритого доступу — ERA-Interim та ERA5 [27] для двох наборів даних.

Для періодів пожеж 2015 та 2018 рр. при моделюванні атмосферного перенесення радіоактивних

аерозолів від лісових пожеж використовувалися дані БД ERA-Interim [10, 28, 29], в якій були об'єднані в один файл дані для примежевого шару атмосфери і для розташованих вище шарів атмосфери (на ізобаричних рівнях від 1 000 до 1 гПа). Використовувалися дані реаналізу, які були висхідними для моделі чисельного прогнозу погоди США WRF V3.9 [29]. Областю прогнозу були дві сіткові області: 1) Grid1 — область рахунку 142×100 вузлів по горизонталі з кроком 10 км, що покриває всю Україну; 2) Grid2 — область рахунку 145×121 вузлів з кроком 3,3 км, що покриває ЧЗВ (рис. 14). Налаштування та обробка даних та програм здійснюється за допомогою графічного інтерфейсу WRF — Portal, встановленого на локальному комп'ютері для отримання необхідної інформації у вигляді даних аналізу та прогнозу метеоелементів через кожні 6 год. Висхідні дані в кодї Grib2 оброблялися програмами об'єктивного аналізу та препроцесування WPS, що включають:

geogrid — для генерування статичних та географічних даних;

ungrib — конвертація метеоданих в обмінний формат NetCDF;

metgrid — горизонтальна інтерполяція метеоданих у вузли регулярної сітки.

Робота з науковими даними, і тим більше з метеорологічними, для яких створювався формат NetCDF, вимагає подання даних у вигляді масивів (матриць). Дані в такому форматі містять додаткову інформа-



Рис. 14. Області підготовки прогностичної аеросиноптичної інформації: 1 — центр області рахунку 142×100 з кроком 10 км, що покриває Україну; 2 — центр області рахунку 145×121 з кроком 3,3 км для території ЧЗВ

цію — в яких одиницях вимірювався параметр, за допомогою яких моделей він був отриманий, хто автор і т. д. Формат NetCDF забезпечує так звану кросплатформність, тобто читання інформації однаковим чином на всіх комп'ютерах та операційних системах:

перетворення на формат «x, y, z» та створення картографічного шару для просторового аналізу в геоінформаційній системі (ГІС) ArcGis;

аналітична та статистична обробка у програмному середовищі MATLAB (Matrix Laboratory) засобами mexcdf/snctools, спеціально створеними для роботи з багатовимірними матрицями формату NetCDF.

Загальна структура прогностичної системи WRF складається з таких основних блоків: попередньої обробки (WPS — WRF Preprocessing System), ініціалізації Real, моделі WRF (динамічного модуля ARW та параметризації) і системи підготовки та виведення результатів моделювання.

Розрахунок прогностичних полів метеоелементів проводився з одностороннім урахуванням вкладеності сіток з використанням базової конфігурації моделі WRF Ver3.9.1, що включає:

використання глобальної чисельної моделі прогнозу погоди GFS для граничних умов;

параметризацію підсіткових масштабів.

Прогностичні поля GFS визначають початкові та граничні умови для моделі WRF. Граничні умови на нижній границі залежать від властивостей підстильної поверхні, і для її опису використовуються дані Геологічної служби США (USGS): висота рельєфу над рівнем моря, категорія підстильної поверхні та параметр шорсткості, типи рослинності та ґрунту, середньосезонна температура повітря, середньомісячне альbedo тощо [29].

Параметризація підсіткових масштабів у моделі WRF-ARW для випадків пожеж 2015 та 2018 рр. (весняний період року) проводилася з використанням нижченаведених моделей.

Параметризація довгохвильової радіації (ra_lw_physics = 1) — за схемою RRTM (Radiative Transfer Model), що використовує метод корельованих коефіцієнтів поглинання.

Параметризація короткохвильової радіації (ra_sw_physics = 1) — за схемою Dudhia, що враховує вплив зенітного кута сонця, властивості хмарності та водяної пари, що поглинають та відбивають випромінювання.

Параметризація мікрофізичних процесів (mp_physics = 3) — за схемою WSM3 (WRF — Single-

Момент 3-класу) — проста ефективна схема врахування частинок льоду та снігу, придатна для мезомасштабних розмірів чисельної сітки.

Параметризація приземного шару атмосфери (sf-sfclay-physics = 1) — за схемою Monin_Obukhov&Carston-Boland з використанням в'язкого підшару і стандартних функцій подібності Моніна-Обухова для логарифмічного профілю вітру.

Параметризація моделі ґрунтового шару (sf_surface_physics = 2) — за схемою Unified Noah land-surface model (моделюється вологість ґрунту, температура ґрунту, температура поверхні ґрунту, глибина та щільність сніжного покриву).

Параметризація примежевого шару атмосфери (bl_pbl_physics = 1) — параметризація університету Йонсей (YSU). Нелокальна K-схема з явним шаром залучення та параболічним K-профілем при нестійкому шарі перемішування. У схему YSU додано шар залучення на верхній границі примежевого шару.

Результати розрахунків на 6–12 год прогнозу (поля температури, швидкості та напрямки вітру, параметри примежевого шару атмосфери, опади тощо) із заданим кроком у часі 1 год для двох сіток запам'ятовуються в певному каталозі, а після закінчення рахунку конвертуються в текстовий формат і передаються до БД «Розрахунки» для проведення розрахунків за моделлю атмосферного перенесення радіонуклідів LEDI.

Для періодів пожеж 2020 та 2022 рр. для моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів від лісових пожеж використовувалися дані БД ERA5 Copernicus [27], які представлені двома наборами даних [30, 31]: погодинні дані прогнозу на рівні землі та на рівнях тиску від 1 000 до 500 гПа. Приклад сітки, представлений на рис. 15 з кроком 31 км по горизонталі та з 37 рівнями по вертикалі, включає всю територію України (регіон України: 15E — 50E, 58N — 40N), дані з вузлів якої вибираються відповідно до вимог чисельної моделі атмосферного перенесення радіонуклідів LEDI.

Висновки

У статті представлено основні кроки сучасної технології забезпечення програмного комплексу LEDI-WRF поточною аеросиноптичною інформацією та прогностичними даними, отриманими за моделлю чисельного прогнозу погоди загального користування WRF-ARW. Сучасні системи оперативного мезомасштабного прогнозу погоди, якою є WRF V3.9, ґрунтуються на спільній роботі з систе-

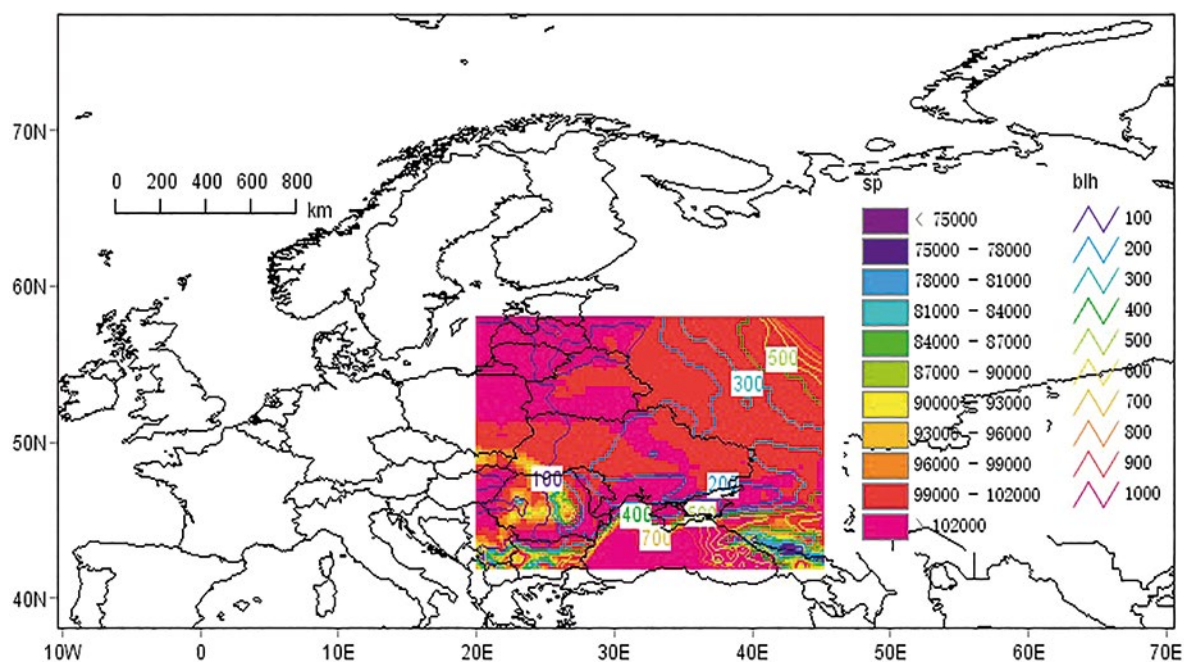


Рис. 15. Область прогностичної метеорологічної інформації, яка використовується в моделі атмосферного перенесення LEDI (дані за 21 березня 2022 р. станом на 06:00). blh — ізолінії висоти примежевого шару атмосфери (м) на тлі приземного тиску (sp в Па)

мою глобального прогнозу погоди GFS. Зокрема, підсистема глобального моделювання процесів в атмосфері постачає початкові та прогностичні дані на бічних границях області мезомасштабного прогнозу та поле початкового наближення для відновлення початкового температурно-баричного поля за даними спостереження, якщо не існує відповідної підсистеми засвоєння даних.

За допомогою проведеного синоптичного аналізу (при спільному використанні даних спостережень біля поверхні землі та на висотах з картами приземного тиску) періодів лісових пожеж у ЧЗВ виділено найтипівіші синоптичні ситуації, пов'язані з проходженням холодних фронтів та напрямком північно-західних вітрів. Детальна характеристика динаміки змін основних метеоелементів та аналіз вертикальних профілів температури та вітру у примежевому шарі атмосфери дозволяє підібрати для таких випадків найбільш адекватні моделі параметризації примежевого та приземного шарів атмосфери та ґрунтову модель.

У зв'язку з глобальними кліматичними змінами погоди (зменшення кількості опадів за останні 5 років та збільшення температури повітря, що супроводжується посиленням швидкості вітру), непередбачуваною людською діяльністю у вигляді підпалів, воєнних дій, збільшується кількість випадків пожеж лісових територій, промислових та житлових

об'єктів. Сучасні відкриті джерела даних чисельного прогнозу погоди [10, 28–33] дозволяють створити сучасне метеорологічне забезпечення для моделювання процесів атмосферного перенесення та осадження забруднюючих речовин за допомогою програмного комплексу LEDI-WRF.

Список використаної літератури

1. Meteorological Analysis of the 2021 Extreme Wildfires in Greece: Lessons Learned and Implications for Early Warning of the Potential for Pyroconvection / T. M. Giannaros, G. Papavasileiou, K. Lagouvardos, et al. // *Atmosphere*. — 2022. — Vol. 13. — P. 475. — doi.org/10.3390/atmos13030475.
2. Guidelines on communicating forecast uncertainty / J. Gill, J. Rubiera, C. Martin, et al. // *World Meteorological Organisation*. — 2008. — PWS-18; WMO/TD No. 1422. — Available at: <https://www.preventionweb.net/publication/guidelines-communicating-forecast-uncertainty>.
3. Zaiko P. O. Meteorological data assimilation in mesoscale numerical model WRF-ARW in the republic of Belarus / *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*. — 2020. — No. 3 (55). — P. 4–10.
4. Иванов А. В. Моделирование метеоусловий в районе порта и в прибрежной зоне залива Тикси / А. В. Иванов, С. В. Стрижак, М. И. Захаров // *Труды ИСП РАН*. —

2019. — № 31, вып. 6. — С. 163–176. — doi.org/10.15514/ISPRAS-2019-31(6)-9.
5. Набокова Е. В. Опыт применения модели WRF с учетом двух методов параметризации городского подслоя для прогноза температуры воздуха и скорости ветра / Е. В. Набокова // Труды ГМЦ России. — 2010. — Вып. 344. — С. 180–195.
 6. Халченков А. В. Использование методов релаксации в модели WRF для анализа метеорологических условий в Украине за длительный период / А. В. Халченков, И. В. Ковалец // Математичні машини і системи. — 2020. — № 2. — С. 30–42.
 7. Оценка точности численных прогнозов метеорологических условий в районе г. Томска с использованием модели WRF / Л. И. Кижнер, Н. К. Барашкова, А. С. Ахметшина и др. // Вестник Томского государственного университета. — 2013. — № 374. — С. 174–178.
 8. The ERA5 global reanalysis. Research article / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford, et al. // Q. J. R. Meteorol. Soc. — 2020. — Vol. 146. — P. 1999–2049.
 9. National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research Reanalysis (NCEP-NCAR1) — Other Flux // Australian Research Data Commons (ARDC). — Available at: <https://researchdata.edu.au/national-centers-environmental-1-flux/15271>.
 10. The Research Data Archive. — Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets/>.
 11. Climate Data. ERA-INTERIM // National Center for Atmospheric Research Climate Data Guide. — Available at: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>.
 12. ERA-Interim // European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. — Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim>.
 13. The World in Weather Charts. — Available at: http://www1.wetter3.de/archiv_dwd_en.html.
 14. Wetterzentrale. — Available at: <https://www.wetterzentrale.de/reanalysis.php>.
 15. Soundings // University of Wyoming: official website. — Available at: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
 16. Weather archive. — Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php>.
 17. Datasets // Climate Data Store. — Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>.
 18. Зверев А. С. Синоптическая метеорология / А. С. Зверев. — Ленинград : Гидрометеиздат, 1977. — 436 с.
 19. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Ч. 1. / Под ред. С. Л. Белоусова и др. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1986. — 696 с.
 20. SaveEcoBot. Maps. — Available at: <https://www.saveecobot.com/maps#7/50.611/31.300/pm10>.
 21. AERONET Aerosol Optical Depth Data Display Interface. Kyiv-AO site. — Available at: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3?site=Kyiv-AO.
 22. A case of extreme particulate matter concentrations over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine / W. Birmili, K. Schepanski, A. Ansmann, et al. // Atmos. Chem. Phys. — 2008. — Vol. 8. — P. 997–1016.
 23. Observations and Cloud-Resolving Modeling of Haboob Dust Storms Over the Arabian Peninsula / A. Anisimov, D. Axisa, P. A. Kucera, et al. // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2018. — Vol. 12. — P. 147–179. — doi.org/10.1029/2018JD028486.
 24. Яковлева Д. В. Анализ оптических характеристик атмосферного аэрозоля над Чёрным морем с мая 2006 по сентябрь 2007 гг. / Д. В. Яковлева, Г. А. Толкаченко // Радиофизика и электроника. — 2008. — Том 13, № 2. — С. 185–189.
 25. Калинская Д. В. Исследование особенностей оптических характеристик пылевого аэрозоля над Черным морем / Д. В. Калинская // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу : зб. наук. пр. — Севастополь, 2012. — Вип. 26, том 2. — С. 151–162. Режим доступу: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56874>.
 26. AERONET Data Download Tool. Version 3 Direct Sun Algorithm. Kyiv-AO site. — Available at: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/webtool_aod_v3?stage=3®ion=Europe&state=Ukraine&site=Kyiv-AO&place_code=10.
 27. Climate Data Store. — Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu>.
 28. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, et al. // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. — 2022. — Vol. 137. — P. 553–597.
 29. ARW Version 3.9 Modeling System User's Guide. User's Guide for the NMM core of the Weather Research and Forecast (WRF) modeling system. — April 2008. — 214 p. — Available at: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
 30. ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present. — doi.org/10.24381/cds.adbb2d47. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
 31. ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present. — doi.org/10.24381/cds.bd0915c6. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>.
 32. Evaluation of radioactive air contamination due to a forest fire within the Exclusion zone on 5–8 June, 2018 / М. М. Talerko, Т. D. Lev, S. I. Kireev, et al. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2019. — Vol. 14 (2). — P. 47–57.

33. Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020 / M. Talerko, I. Kovalets, T. Lev, et al. // *Atmospheric Pollution Research*. — 2021. — Vol. 12 (3). — P. 193–204. — doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010.

T. D. Lev, M. M. Talerko

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Analysis and Modeling of Meteorological Conditions for the Transport of Radionuclides During Periods of Forest Fires and Dust Windstorms in the Chornobyl Exclusion Zone

The simulation of meteorological conditions of the atmospheric transport of radioactive aerosols during the periods of wildland fires (2015, 2018, 2020 and 2022) and dust storm (April 16–17, 2020) in the Chornobyl Exclusion Zone was carried out using the archive of reanalysis data of the European Center for Medium-Term Weather Forecasts (ECMWF). Modeling of meteorological conditions and preparation of aerosynoptic information for the LEDI model of atmospheric transport and deposition of pollutants during periods of intense emission of radionuclides into the atmosphere was carried out using two sources of information: the results of the numerical weather forecast model WRF-ARW (USA) using the databases of the Reanalysis Project, and forecast data obtained according to the GFS global model and the ECMWF operational model, which are stored in the database of the CDS climate data repository (ERA5 Copernicus). The used WRF-ARW numerical model is adapted for the territory of Ukraine by selecting parameterization models of the main physical processes in the atmosphere in accordance with synoptic situations and the season of the year. A description of typical and extreme synoptic situations during the analyzed periods of wildland fires is given using the archive of synoptic maps of surface pressure and topography AT500 for the European territory and modern technologies of geoinformation systems. With the help of the conducted synoptic analysis of wildland fire periods, the most typical synoptic situations associated with the passage of cold fronts and the direction of north and northwest winds, which contribute mostly to the secondary radioactive contamination of environmental objects in the zone of influence of emission sources in the Chornobyl Exclusion

Zone, were identified. Because of global climate changes and unpredictable human activity in the form of arsons, military actions, etc., the number of fires in forest areas, industrial and residential facilities is increasing. Open sources of numerical weather forecast data make it possible to create modern meteorological support for modeling of atmospheric transport and deposition of pollutants and assessment of secondary environmental pollution using the LEDI-WRF software complex.

Keywords: numerical weather forecast models, extreme meteorological situation, meteorological data bases, modeling of atmospheric transport, radionuclides.

References

1. Giannaros T. M., Papavasileiou G., Lagouvardos K., Kotroni V., Dafis S., Karagiannidis A., Dragozi E. (2022). Meteorological analysis of the 2021 extreme wildfires in Greece: Lessons learned and implications for early warning of the potential for pyroconvection. *Atmosphere*, vol. 13, p. 475. doi.org/10.3390/atmos13030475.
2. Gill J., Rubiera J., Martin C., Cacic I., Mylne K., Dehui C., Jiafeng G., Xu T., Yamaguchi M., Foamouhou K., Poolman E., Guiney J., Kootval H. (2008). *Guidelines on communicating forecast uncertainty*. PWS-18; WMO/TD No. 1422. World Meteorological Organisation. Available at: <https://www.preventionweb.net/publication/guidelines-communicating-forecast-uncertainty>.
3. Zaiko P. O. (2020). Meteorological data assimilation in mesoscale numerical model WRF-ARW in the republic of Belarus. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe (East European Scientific Journal)*, no. 3 (55), pp. 4–10.
4. Ivanov A. V., Stryzhak S. V., Zakharov M. I. (2019). [Modeling of weather conditions in the port area and in the coastal zone of the Tiksi Bay]. *Proceedings of the ISP RAS*, vol. 31, no. 6, pp. 163–176. doi.org/10.15514/IS-PRAS-2019-31(6)-9. (in Rus.)
5. Nabokova E. V. (2010). [Experience in the application of the WRF model, taking into account two methods of parametrization of the urban sublayer for forecasting air temperature and wind speed]. *Proceedings of the GMTs of Russia*, vol. 344, pp. 180–195. (in Rus.)
6. Khalchenkov A. V., Kovalets I. V. (2020). [Using relaxation methods in the WRF model to analyze meteorological conditions in Ukraine over a long period]. *Mathematical machines and systems*, no 2, pp. 30–42. (in Rus.)
7. Kizhner L. I., Barashkova N. K., Akhmetshina A. S., Bart A. A., Polyakov D. V. (2013). [Estimation of the accuracy of numerical forecasts of meteorological conditions

- in the region of Tomsk using the WRF model]. *Bulletin of Tomsk State University*, no. 374, pp. 174–178. (in Rus.)
8. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. Research article. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 146, pp. 1999–2049.
 9. National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research Reanalysis (NCEP-NCAR). Other Flux. Australian Research Data Commons (ARDC). Available at: <https://researchdata.edu.au/national-centers-environmental-1-flux/15271>.
 10. The Research Data Archive. Available at: <https://rda.ucar.edu/datasets>.
 11. Climate Data. ERA-INTERIM. National Center for Atmospheric Research Climate Data Guide. Available at: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-interim>.
 12. ERA-Interim. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Available at: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/archive-datasets/reanalysis-datasets/era-interim>.
 13. The World in Weather Charts. Available at: http://www1.wetter3.de/archiv_dwd_en.html.
 14. Wetterzentrale. Available at: <https://www.wetterzentrale.de/reanalysis.php>.
 15. Weather. Soundings. University of Wyoming: official website. Available at: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>.
 16. Weather archive. Available at: <http://www.pogodaiklimat.ru/archive.php>.
 17. Datasets. Climate Data Store. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>.
 18. Zverev A. S. (1977). *Sinopticheskaya meteorologiya* [Synoptic meteorology]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 436 p. (in Rus.)
 19. Belousov S. L., et al. (eds.) (1986). *Rukovodstvo po kratkosrochnym prognozam pogody. Ch. 1.* [Guide to short-range weather forecasts. Part 1]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 696 p. (in Rus.)
 20. SaveEcoBot. Maps. Available at: <https://www.saveecobot.com/maps#7/50.611/31.300/pm10>.
 21. AERONET Aerosol Optical Depth Data Display Interface. Kyiv-AO site. Available at: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/data_display_aod_v3?site=Kyiv-AO.
 22. Birmili W., Schepanski K., Ansmann A., et al. (2008). A case of extreme particulate matter concentrations over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine. *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 8, pp. 997–1016.
 23. Anisimov A., Axisa D., Kucera P. A., et al. (2018). Observations and Cloud-Resolving Modeling of Haboob Dust Storms Over the Arabian Peninsula. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 12, pp. 147–179. doi.org/10.1029/2018JD028486.
 24. Yakovleva D. V., Tolkachenko G. A. (2008). [Analysis of the optical characteristics of atmospheric aerosol over the Black Sea from May 2006 to September 2007]. *Radiophysics and Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 185–189. (in Rus.)
 25. Kalinskaya D. V. (2012). [Investigation of the features of the optical characteristics of dust aerosol over the Black Sea]. *Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources*, vol. 26, no. 2, pp. 151–162. Available at: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/56874>. (in Rus.)
 26. AERONET Data Download Tool. Version 3 Direct Sun Algorithm. Kyiv-AO site. — Available at: https://aeronet.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/webtool_aod_v3?stage=3®ion=Europe&state=Ukraine&site=Kyiv-AO&place_code=10.
 27. Climate Data Store. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu>.
 28. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., et al. (2022). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, pp. 553–597.
 29. *ARW Version 3.9 Modeling System User's Guide. User's Guide for the NMM core of the Weather Research and Forecast (WRF) modeling system.* April, 2008. 214 p. Available at: <http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users>.
 30. *ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present.* doi.org/10.24381/cds.adbb2d47. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.
 31. *ERA5 hourly data on pressure levels from 1979 to present.* doi.org/10.24381/cds.bd0915c6. Available at: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=overview>.
 32. Talerko M. M., Lev T. D., Kireev S. I., Kashpur V. O., Kuzmenko G. G. (2019). Evaluation of radioactive air contamination due to a forest fire within the Exclusion zone on 5–8 June, 2018. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 14, no. 2, pp. 47–57. doi.org/10.31717/2311–8253.19.1.7.
 33. Talerko M., Kovalets I., Lev T., Igarashic Y., Romanenko O. (2021). Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wildland fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. *Atmospheric Pollution Research*, vol. 12, no. 3, pp. 193–204. doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010.

Надійшла: 09.08.2022

Received: 09.08.2022