

Чисельне моделювання формування радіоактивного забруднення України після Чорнобильської катастрофи: вплив вхідних метеорологічних даних на невизначеність результату

О.Я. Скриник¹, С.М. Бубін², 2023

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна

²Департамент фізики, університет Назарбаєва, Астана, Казахстан
Надійшла 8 грудня 2022 р.

У статті представлено кількісне оцінювання чутливості результатів чисельного моделювання формування поверхневого забруднення території України радіонуклідами ¹³⁷Cs після аварії на Чорнобильській атомній електростанції у 1986 році до вхідних метеорологічних даних. Для розрахунку атмосферного перенесення, дисперсії та осідання (вологого та сухого вимивання) радіоактивних аерозолів було використано моделюючий програмний комплекс CALPUFF. Параметризація джерела викидів ¹³⁷Cs під час активної фази аварії (26 квітня — 5 травня 1986 р.) здійснена на основі раніше опублікованих в науковій літературі результатів. Сімнадцять різних версій/реалізацій вхідної метеорології для CALPUFF було отримано за допомогою регіональної прогностичної метеорологічної моделі WRF, комбінуючи доступні для 1986 р. дані глобальних атмосферних реаналізів (NNRP, ERA-Interim, ERA5, CFSR) та фізичні параметризації самої моделі (мікрофізика, радіаційні процеси та фізика граничного/приземного шарів). Кількісне оцінювання невизначеності результатів розрахунків було проведено двома способами. У першому способі, невизначеність розраховувалась як ширина/розмах розподілу значень поверхневих концентрацій ¹³⁷Cs (у логарифмічному масштабі), отриманих при різних версіях вхідної метеорології. Другий підхід базувався на основі статистичного порівняння розрахованих значень поверхневого забруднення та відповідних вимірних даних, які були отримані під час комплексного оцінювання наслідків катастрофи на початку 90-х років минулого століття. Дві статистичні метрики/показники було використано для порівняння: геометричні середні відхилення та дисперсія. Результати дослідження демонструють, що навіть при використанні різних версій певною мірою уніфікованих метеорологічних даних (атмосферних реаналізів), результати розрахунків поверхневої концентрації радіонуклідів в одних і тих же просторових локаціях можуть відрізнятися один від одного на декілька порядків величини. Крім того, невизначеність розрахунків залежить не тільки від відстані до джерела емісій, але і від фізичного механізму відповідального за формування поверхневого забруднення (вологого чи сухого вимивання).

Ключові слова: Чорнобильська катастрофа, радіоактивне забруднення місцевості, ¹³⁷Cs, атмосферне перенесення та дисперсія, вологе та сухе вимивання аерозолів, чисельне моделювання, невизначеність, WRF, CALPUFF.

Citation: Skrynyk, O.Y., & Bubin, S.M. (2023). Numerical simulation of the radioactive contamination of Ukraine after the Chornobyl disaster: the influence of the input meteorological data on the results uncertainty. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(2), 77–93. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i2.278332>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Вступ. Агресивна неспровокована війна Росії проти України кардинально підвищила ризики виникнення аварійних чи нештатних ситуацій на атомних електростанціях (АЕС), які знаходяться на території нашої країни. До того ж на момент написання цієї статті Запорізька АЕС все ще перебуває під окупацією та постійно використовується агресором для ядерного шантажу світової спільноти. Наслідками можливих аварій на українських АЕС глибоко занепокоєні не тільки населення України, а й світова громадськість, оскільки аварії на об'єктах ядерної енергетики зазвичай призводять не лише до регіонального забруднення територій, а й до транскордонного перенесення радіоактивності [De Cort et al., 1998]. Занепокоєність ще більше загострюється, оскільки наслідки гіпотетичних аварій дуже важко спрогнозувати чи навіть приблизно оцінити через надзвичайно високу невизначеність параметрів джерела потенційних викидів радіонуклідів.

Одним із основних інструментів для прогнозування та оцінювання наслідків аварій на АЕС є чисельне моделювання атмосферного перенесення, турбулентного розсіювання та осідання/вимивання радіонуклідів. Зокрема, ефективним інструментом є готові до використання спеціалізовані програмні комплекси — моделі атмосферної дисперсії, такі як CALPUFF, HYSPLIT, FLAXPART, WRF-Chem та багато інших [Leelóssy et al., 2018]. Проте слід пам'ятати, що моделі атмосферної дисперсії, як і будь-які інші чисельні моделі природних чи техногенних процесів, є лише наближенням до реальності та відображають її лише з певною точністю. Зазначимо, що сукупна невизначеність результатів чисельного моделювання атмосферної дисперсії газо-аерозольних домішок складається з декількох складових. Крім можливих неточностей при заданні параметрів емісій (потужності, часової динаміки, горизонтального та вертикального розподілу, а також фізико-хімічних властивостей самих домішок), джерелами невизначеності результатів розрахунків є

також чисельна/комп'ютерна модель, яка побудована на певній системі математичних рівнянь і співвідношень, та вхідні метеорологічні дані.

Метою публікації є проведення кількісного оцінювання невизначеності результатів чисельного моделювання формування радіоактивного забруднення України після Чорнобильської катастрофи у 1986 р., джерелом якої є вхідна метеорологічна інформація. Кількісне визначення чутливості результатів моделювання до вхідної метеорології дасть змогу краще зрозуміти межі можливих помилок, які вносяться через неточне задання метеорологічних даних. Це надзвичайно важливо з точки зору можливого оперативного реагування на надзвичайні/аварійні ситуації з використанням дисперсійних моделей. Зазначимо, що вплив вхідних метеорологічних даних на результати розрахунків атмосферного перенесення та дисперсії радіонуклідів після аварії на Фукусімській АЕС розглядався в публікаціях [Draxler et al., 2013; Arnold et al., 2015; Leadbetter et al., 2015]. Наскільки відомо авторам, чутливість результатів чисельних моделювань формування радіоактивного забруднення України після Чорнобильської аварії до використаної вхідної метеорології детально не досліджувалась.

Зауважимо, що чисельне моделювання є надзвичайно важливим інструментом дослідження різних аспектів теорії атмосферної дифузії. Адекватні чисельні моделі дають змогу глибше зрозуміти фізику процесів атмосферного перенесення, турбулентного розсіювання та осідання газо-аерозольних домішок, зокрема під час формування радіоактивного чорнобильського забруднення України [Voloshchuk, Shkvorets, 1993; Talerko, 2005; Волощук та ін., 2007; Скриник, Грицюк, 2007; Skrynyuk et al., 2019; Talerko et al., 2021]. Тому інформація про кількісні характеристики невизначеності результатів моделювань є надзвичайно важливою.

Дані та методи. *Прогностична метеорологічна модель WRF та моделюючий комплекс атмосферної дисперсії CALPUFF.* У дослідженні генерування статистичного

ансамблю різних версій (окремих реалізацій) вхідних 3D метеорологічних даних для подальшого розрахунку атмосферного перенесення та розсіювання радіоактивних аерозолів було здійснено за допомогою мезомасштабної прогностичної метеорологічної моделі Weather for Research and Forecast (WRF) v4.3 [Skamarock, Klemp, 2008]. Зазначимо, що поєднання прогностичної метеорологічної та дисперсійної моделей є зараз основним підходом при вирішенні відповідних прикладних задач. Альтернативою є безпосереднє залучення до розрахунків даних строкових вимірів наземних метеорологічних станцій та вертикальних зондувань атмосфери. Проте останній підхід суттєво обмежений через недостатню просторово-часову роздільну здатність вимірів, пропуски у вимірах (особливо у вертикальних зондуваннях атмосфери) тощо.

WRF є спільною розробкою низки провідних профільних наукових центрів, організацій та університетів США, створеною як для оперативних прогнозів погоди, так і для проведення наукових досліджень. Модель постійно оновлюється, її останні версії відображають сучасний стан метеорологічної та суміжних наук. Загалом, WRF містить два динамічних ядра (для чисельного розв'язку повної системи рівнянь гідротермодинаміки атмосфери), систему асиміляції даних, систему підготовки вхідних даних (препроцесінгу), а також засоби постпроцесінгу та візуалізації результатів розрахунків. Модель відзначається високою гнучкістю і переносимістю на різні обчислювальні платформи та ефективністю використання при паралельних чисельних розрахунках. WRF широко використовується для вирішення різних теоретичних і прикладних метеорологічних задач на значному діапазоні просторових масштабів: від десятків метрів до тисяч кілометрів [WRF, 2019].

Для розрахунку атмосферного перенесення, турбулентного розсіювання та осідання радіоактивних аерозолів був використаний моделюючий комплекс California Puff (CALPUFF) v6 [Scire et al., 2000a,b],

розроблений в США. CALPUF — гауссова лагранжева клубова (puff) модель атмосферної дисперсії, яка здатна враховувати вплив нестационарності та просторової неоднорідності метеорологічних умов на дисперсійні процеси. Крім дисперсійного блоку (CALPUFF), модель містить також низку пре- та постпроцесорів (TERREL, CALMET, CALPOST та ін.). Протягом тривалого часу, з квітня 2003 р. до січня 2017 р., CALPUFF була основною моделлю, рекомендованою державною агенцією США з охорони оточуючого середовища (US EPA) для розрахунків атмосферної дисперсії на значних просторових масштабах та відстанях від джерела викидів. Модель активно використовується для вирішення широкого спектру прикладних задач атмосферної дисперсії. Стосовно України комплекс CALPUFF використовувався для моделювання атмосферної дисперсії радіоактивних домішок [Kovalets et al., 2017], зокрема викидів після аварії на Чорнобильській АЕС [Gioaitti et al., 2018].

Глобальні дані для метеорологічної моделі WRF. Прогностична модель WRF здійснює розрахунки, використовуючи глобальні 3D дані, які зазвичай постачаються з досить грубою просторовою та часовою роздільною здатністю, як початкові та граничні умови. Іншими словами, модель WRF — інструмент для здійснення фізичного/динамічного уточнення чи зменшення масштабів глобальних даних (dynamical downscaling).

У дослідженні було використано чотири різних набори глобальних даних (реаналізів), які у вільному доступі є у мережі Інтернет, для періоду дослідження з 26 квітня до 10 травня 1986 р. Вони відрізняються один від одного просторовою роздільною здатністю розрахункових сіток, часовою дискретністю, використаними чисельними моделями глобальної динаміки атмосфери, а також наборами емпіричних даних, які були асимільовані під час модельних розрахунків.

Глобальний реаналіз NNRP (NCEP/NCAR Reanalysis Project) [Kalnay et al., 1996] — спільний продукт Національно-

го центру прогнозів оточуючого середовища (National Centers for Environmental Prediction — NCEP) і Національного центру атмосферних досліджень (National Center for Atmospheric Research — NCAR) США. NNRP був спочатку створений для періоду 1957—1996 рр., проте згодом був розширений. Нині він охоплює період з 1948 р. до сьогодні і постійно оновлюється. Просторова (горизонтальна) роздільна здатність даних реаналізу NNRP становить $2,5^\circ$, часова дискретність — 6 год. У вертикальному напрямі дані реаналізів розраховують на модельних рівнях у вибраній системі координат. Проте розраховані значення метеорологічних величин зазвичай також інтерполюють у ізобаричні рівні атмосфери. У нашому дослідженні для розрахунків WRF було використано дані NNRP на 17 вертикальних рівнях (стандартних рівнях атмосферного тиску від 1000 до 10 гПа).

Глобальний атмосферний реаналіз ERA-Interim було розроблено Європейським центром середньострокових прогнозів погоди (European Center for Medium-Range Weather Forecasts — ECMWF) [Dee et al., 2011]. Дані реаналізу охоплюють період 1979—2019 рр. Їхня горизонтальна роздільна здатність — $0,75^\circ$, часова дискретність — 6 год. У WRF розрахунках було використано дані ERA-Interim, задані на 37 вертикальних рівнях (ізобаричних рівнях атмосфери від 1000 до 1 гПа)

ERA5 — найновіша версія глобального атмосферного реаналізу, створеного ECMWF [Hersbach et al., 2020]. Базовим для даних ERA5 є період з початком у 1979 р. до сьогодні. Проте в експериментальному варіанті дані також представлені і для періо-

ду 1950—1978 рр. Горизонтальна роздільна здатність даних — $0,25^\circ$, часова дискретність — 1 год. Вертикальні рівні такі самі, як і для ERA-Interim.

Реаналіз CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) є ще одним продуктом NCEP [Saha et al., 2010]. Часовий період даних цього реаналізу 1979—2011 рр. Дані доступні з різною горизонтальною роздільною здатністю — від $0,3^\circ$ до $2,5^\circ$. Для моделювання WRF ми використовували версію реаналізу з найвищою горизонтальною щільністю ($0,3^\circ$). Часова роздільна здатність даних — 6 год. У вертикальному напрямі було використано дані на 37 ізобаричних поверхнях (ізобаричних рівнях атмосфери від 1000 до 1 гПа). Стислу узагальнену інформацію щодо всіх використаних глобальних атмосферних реаналізів наведено в табл. 1.

Специфікація чисельних експериментів WRF та CALPUFF. На рис. 1 представлено просторові області моделювання (d01 та d02), використані в чисельних експериментах. Задана просторова (горизонтальна) роздільна здатність розрахункової сітки у d01 — 27 км, у d02 — 9 км. Розрахунки WRF у домені d01 були здійснені тільки при використанні реаналізу NNRP. В останньому випадку використання домену d01 було необхідним, оскільки існують певні обмеження метеорологічної моделі WRF щодо співвідношення між горизонтальною роздільністю глобальних даних та роздільністю використаної розрахункової сітки. Для всіх інших реаналізів WRF симуляції проводилися у d02. Вкладений домен d02 слугував також і розрахунковою областю для моделі атмосферної диспер-

Таблиця 1. Глобальні атмосферні реаналізи, використані як вхідні дані для прогностичної метеорологічної моделі WRF

Реаналіз	Розробник	Період охоплення	Горизонтальна роздільність, град	Часова дискретність, год
NNRP	NCEP/NCAR	починаючи з 1948 р.	2,5	6
ERA-Interim	ECMWF	1979—2019 рр.	0,75	6
ERA5	ECMWF	починаючи з 1950 р	0,25	1
CFSR	NCEP	1979—2011 рр.	0,3	6

сії CALPUFF. У моделі WRF було задано 45 вертикальних розрахункових рівнів, які нерівномірно розподілені з висотою (із щільнішим розподілом у граничному шарі атмосфери). У CALPUFF було використано 10 вертикальних рівнів, відповідно до типових рекомендованих значень.

Для досить тривалих проміжків часу (більше декількох днів) розрахунки WRF можуть згодом накопичувати помилки і таким чином сильно віддалятися від реальності [Lo et al., 2008]. Для уникнення зазначеної чисельної розбіжності у довготривалих WRF розрахунках використовують два підходи. Перший полягає у застосуванні спеціального «підштовхування» моделі (nudging) до даних реаналізу або натурних спостережень під час проведення довготривалих розрахунків, не перериваючи їх [Miguez-Macho et al., 2004; Khalchenkov, Kovalets, 2021]. У другому під-

ході довгий період моделювання розбивають на менш тривалі проміжки (1—2 дні), для яких моделювання проводять окремо [Lo et al., 2008]. У нашому дослідженні було використано другий підхід. Весь 15-денний період (26.04.1986—10.05.1986) було розбито на окремі 36-годинні підперіоди (з 12:00 попередньої доби до 00:00 наступної; для 26 квітня також використано дані за попередню добу). Перші 12 годин кожного підперіоду використовували лише для «розігріву» моделі WRF (spin-up період), і відповідні результати не використовували в подальших розрахунках атмосферної дисперсії.

У табл. 2 представлено специфікацію всіх чисельних експериментів WRF, проведених для отримання статистичного ансамблю 3D метеорологічних даних (окремих погодних реалізацій) для дисперсійної моделі CALPUFF. Детальний опис викорис-

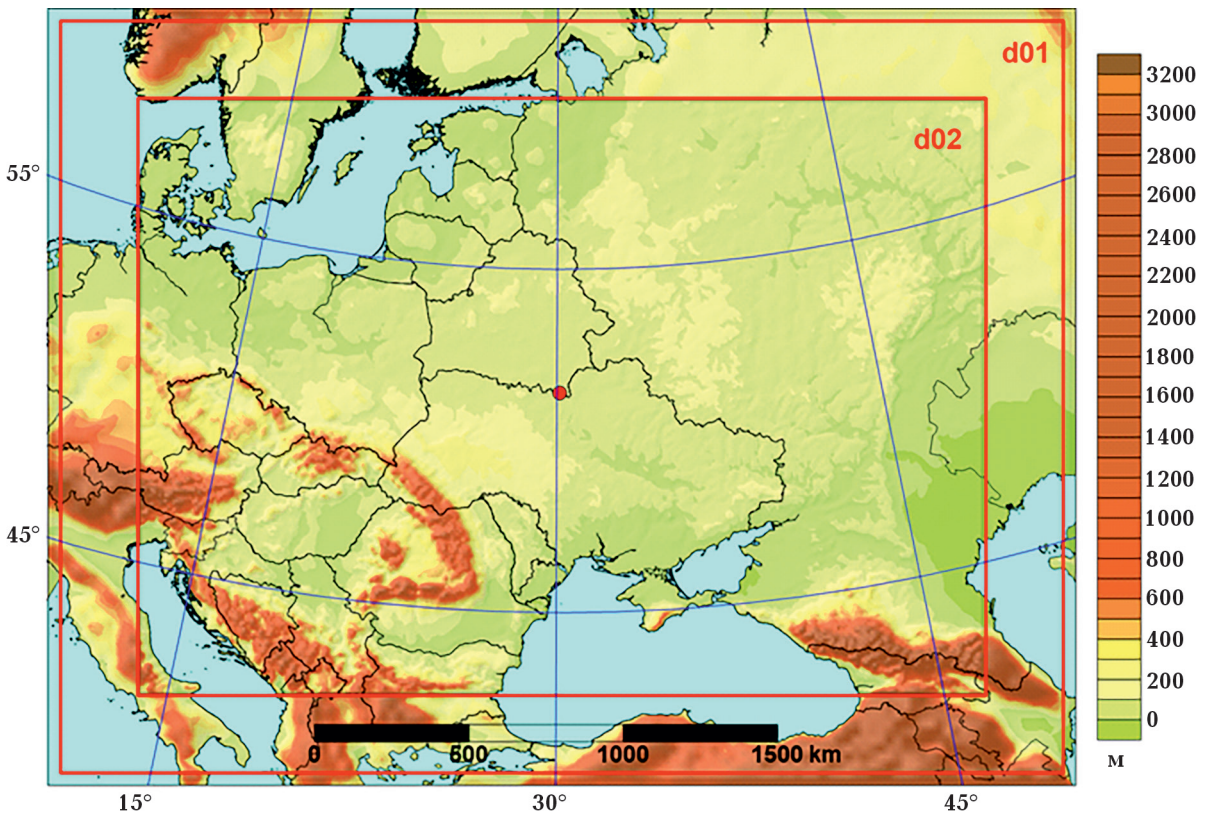


Рис. 1. Просторові області моделювання моделей WRF (d01, d02) та CALPUFF (d02) та їх рельєф. Точка червоного кольору — локація Чорнобильської АЕС.

Fig. 1. Spatial domains for the WRF (d01, d02) and CALPUFF (d02) models and their relief. The red dot denotes Chernobyl Nuclear Power Plant location.

таних фізичних параметризацій наведено у [WRF, 2019]. Їхні комбінації було обрано на основі керівництва користувача моделі [WRF, 2019] та аналізу опублікованих рекомендацій [WRF, 2015].

Контролюючі параметри моделі CALPUFF, а також її метеорологічного препроцесора CALMET, залишалися незмінними для всіх чисельних експериментів. Параметри CALMET, який здійснює трансформацію вихідних файлів WRF до формату CALPUFF, були задані відповідно до рекомендацій [Scire et al., 2012]. Налаштування дисперсійної моделі аналогічне найбільш рейтинговому моделюванню, результати якого наведені у публікації [Giaiotti et al., 2018]. Параметризація джерела викидів ^{137}Cs під час активної фази

аварії (26 квітня — 5 травня 1986 р.) була здійснена на основі раніше опублікованих в науковій літературі результатів [Talerko, 2005]. При використанні вибраної параметризації результати розрахунків сумарного забруднення території України мали кращі верифікаційні оцінки порівняно з іншими аналогічними моделями джерела викидів [Giaiotti et al., 2018].

Верифікаційні дані поверхневого забруднення України радіоактивним цезієм. Для оцінювання чутливості результатів розрахунків радіоактивного забруднення території України після аварії на Чорнобильській АЕС до використаної вхідної метеорології були залучені дані натурних вимірювань поверхневої концентрації ^{137}Cs , здійснених на території країни на

Таблиця 2. Специфікація чисельних експериментів WRF

Номер тесту	Глобальні дані (реаналіз)	Просторова роздільна здатність WRF, км	Фізичні параметризації WRF						
			Мікрофізика	Купчасті хмари	Довгохвильова радіація	Короткохвильова радіація	Граничний шар	Приземний шар	Підстильна поверхня
1	NNRP	27	18	5	1	2	2	2	2
2	NNRP	27	8	3	4	4	1	1	2
3	NNRP	27	8	6	4	4	2	2	2
4	NNRP	27	6	1	1	1	4	4	2
5	NNRP	9	6	1	1	1	4	4	2
6	ERA-Interim	9	18	5	1	2	2	2	2
7	ERA-Interim	9	8	3	4	4	1	1	2
8	ERA-Interim	9	8	6	4	4	2	2	2
9	ERA-Interim	9	6	1	1	1	4	4	2
10	ERA5	9	18	5	1	2	2	2	2
11	ERA5	9	8	3	4	4	1	1	2
12	ERA5	9	8	6	4	4	2	2	2
13	ERA5	9	6	1	1	1	4	4	2
14	CFSR	9	18	5	1	2	2	2	2
15	CFSR	9	8	3	4	4	1	1	2
16	CFSR	9	8	6	4	4	2	2	2
17	CFSR	9	6	1	1	1	4	4	2

Примітка. Числові ідентифікатори фізичних параметризацій подано відповідно до Керівництва користувача [WRF, 2019]. Детальну інформацію з відповідними літературними посиланнями наведено на сайті моделі (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_references.html).

початку 1990-х років. Вимірювання переважно проводились в населених пунктах методом забору проб з подальшим лабораторним аналізом. На рис. 2 представлено просторове розміщення 410 обраних населених пунктів (верифікаційних точок), дані вимірів у яких були використані у дослідженні. Поверхневі концентрації ^{137}Cs , які попередньо було приведено до 10 травня 1986 р., теж представлено на рисунку. Дані отримані в Центральній геофізичній обсерваторії.

Оцінювання невизначеності результатів моделювання. Кількісне оцінювання невизначеності результатів розрахунків було проведено двома способами. У першому способі невизначеність оцінювалась як ширина розподілу значень поверхневих концентрацій ^{137}Cs (переведених у логарифмічний масштаб), отриманих при різних версіях вхідної метеорології. Для характеристики ширини розподілу вико-

ристовувались дві величини (які дещо дублюють, проте і взаємно доповнюють одна одну): різницю/розмах між максимальним і мінімальним значеннями ($\max-\min$) і середнє квадратичне відхилення (SD). Зазначені величини розраховувались для кожної верифікаційної точки $((x_j, y_j), j = 1, \dots, 410)$. Оцінювання невизначеності першим способом можна розглядати як «абсолютне», оскільки воно здійснюється без прив'язки до відповідних вимірних значень поверхневої концентрації ^{137}Cs .

Другий підхід базувався на основі статистичного порівняння розрахованих значень поверхневого забруднення та відповідних вимірних даних, отриманих під час комплексного оцінювання наслідків катастрофи на початку 90-х років минулого століття. У цьому підході було використано дві статистичні метрики/показники: середнє геометричне відхилення (MG) і середню геометричну дисперсію (VG), розраховані

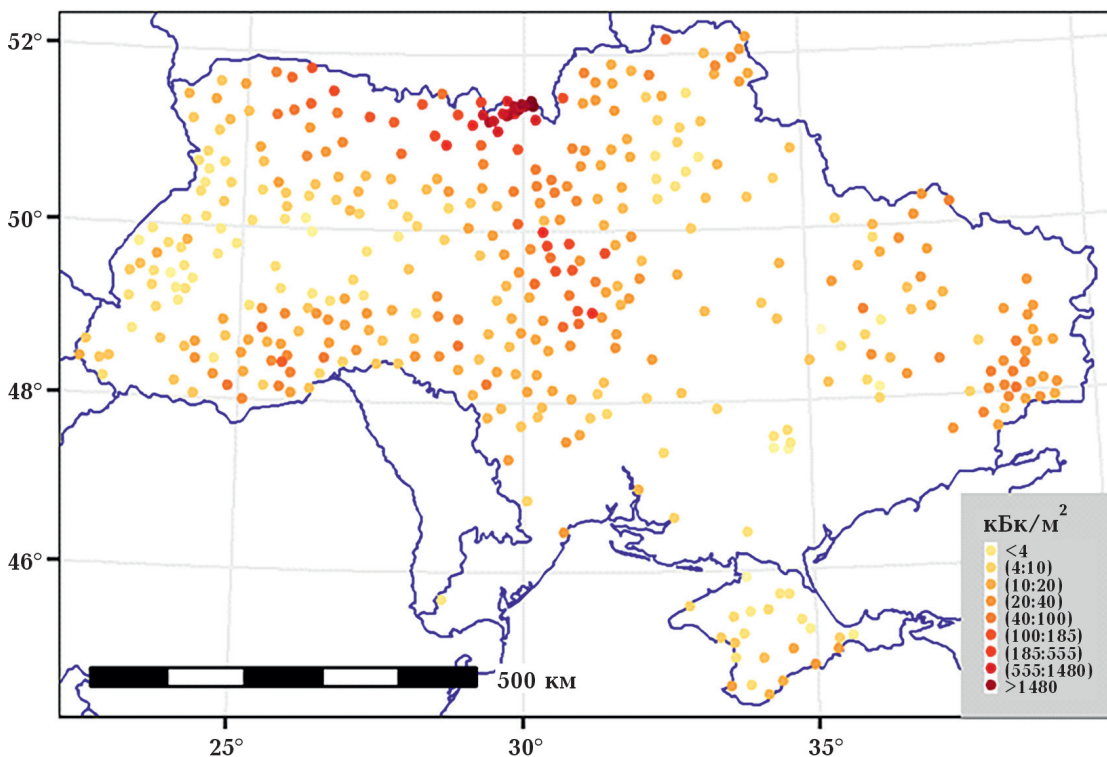


Рис. 2. Розташування верифікаційних точок (410 населених пунктів) на території України та виміряні в них значення накопиченої поверхневої концентрації ^{137}Cs (приведені до травня 1986 р.).

Fig. 2. Locations of 410 verification points on the territory of Ukraine and the corresponding measured ^{137}Cs contaminations (the contamination data were adjusted to May 1986).

за формулами (1) та (2) [Mosca et al., 1998] для кожної верифікаційної локації:

$$MG(x_j, y_j) = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln P_i(x_j, y_j) - \ln M(x_j, y_j))\right) \prod_{i=1}^N \left(\frac{P_i(x_j, y_j)}{M(x_j, y_j)}\right)^{\frac{1}{N}}, \quad (1)$$

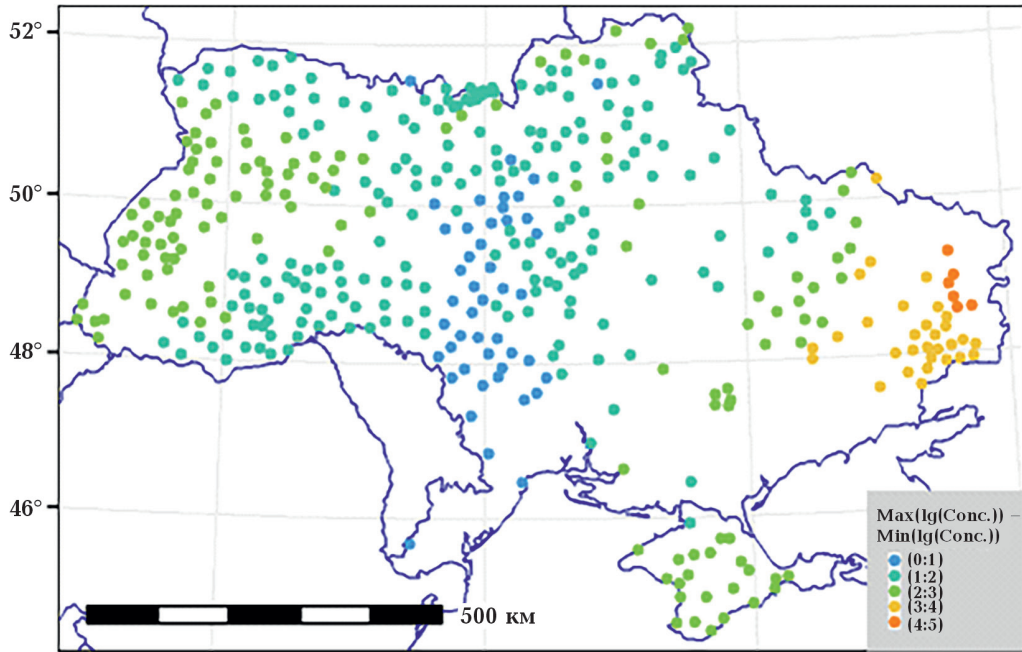
$$VG(x_j, y_j) = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ln P_i(x_j, y_j) - \ln M(x_j, y_j))^2\right) = \exp\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{\ln(P_i(x_j, y_j))}{M(x_j, y_j)}\right)^2\right), \quad (2)$$

де $P_i(x_j, y_j)$ — розраховане значення поверхневої концентрації радіонуклідів ^{137}Cs у i -му чисельному експерименті ($i = 1, \dots, N$), $M(x_j, y_j)$ — виміряне значення, N — кількість чисельних експериментів або реалізацій статистичного ансамблю (у нашому випадку $N=17$). Обидва статистичні критерії доцільно використовувати для оцінювання результатів моделювання, якщо діапазон можливих значень концентрацій охоплює декілька порядків величини. MG дає інформацію про середню переоцінку ($MG > 1$) чи недооцінку ($MG < 1$) розрахованих значень, тоді як VG характеризує ширину розкиду розрахованих значень відносно відповідного виміряного. Очевидно, що VG можна використовувати також і для кількісного оцінювання невизначеності результатів моделювань.

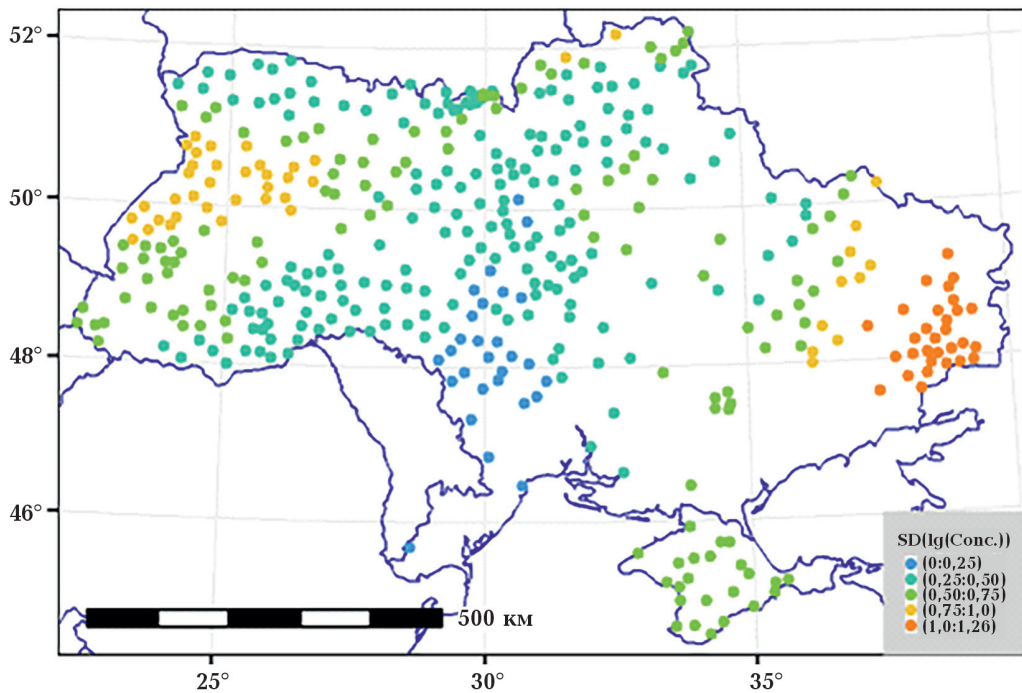
Результати. На рис. 3 представлено кількісні характеристики чутливості результатів розрахунку значень поверхневої концентрації ^{137}Cs до вхідних метеорологічних даних: max—min (рис. 3, а) та SD (рис. 3, б). Як бачимо, просторові розподіли обох характеристик невизначеності добре узгоджуються між собою та є суттєво неоднорідними. Узгодженість між max—min і SD означає, що не існує окремих чисельних експериментів, у яких розраховані значення є значними викидами відносно всіх інших експериментів. Значення max—

min у розглянутих верифікаційних точках на території України змінюється від 0,49 до 4,46. Тобто існують просторові локації, де розраховані (при різних версіях метеорологічних даних) значення поверхневого забруднення радіонуклідами ^{137}Cs відрізняються одне від одного більше ніж на чотири порядки величини. Проте спостерігаються певні просторові закономірності. Так, найменша невизначеність, або найнижча чутливість результатів розрахунків до вхідних метеорологічних даних, спостерігається вздовж південного радіоактивного сліду (з умовним напрямком Київ—Одеса), який був сформований здебільшого за рахунок процесів сухого осідання. Найбільша невизначеність притаманна зоні підвищеної поверхневої концентрації в Донецькій та Луганській областях, сформованої переважно за рахунок атмосферних опадів (вологого вимивання).

Просторовий розподіл розрахованих статистичних метрик MG та VG представлено на рис. 4, а, б відповідно. У більшості верифікаційних локацій значення MG менші одиниці, що свідчить про недооцінку (в середньому за статистичним ансамблем розглянутих погодних реалізацій) розрахованих значень накопиченого забруднення ^{137}Cs відносно відповідних вимірених концентрацій. Переоцінка ($MG > 1$) відзначається здебільшого в центральній частині заходу України, у безпосередній близькості до джерела викидів та на півночі Чернігівської області. Просторовий розподіл значень VG суттєво неоднорідний (строкатий), проте помітні особливості, схожі до просторових розподілів max—min та SD . Так, мінімальні значення VG спостерігаються вздовж південного сліду. Проте навіть у цьому сліді є декілька локацій (які відповідають локальним максимумам поверхневого забруднення), де невизначеність розрахунків дуже суттєва (з максимальними значеннями VG). Максимальні значення середньої геометричної дисперсії також відмічені переважно у Чернівецькій, Луганській та Донецькій областях. Саме в цих регіонах знаходяться локальні максимуми поверхневого ра-



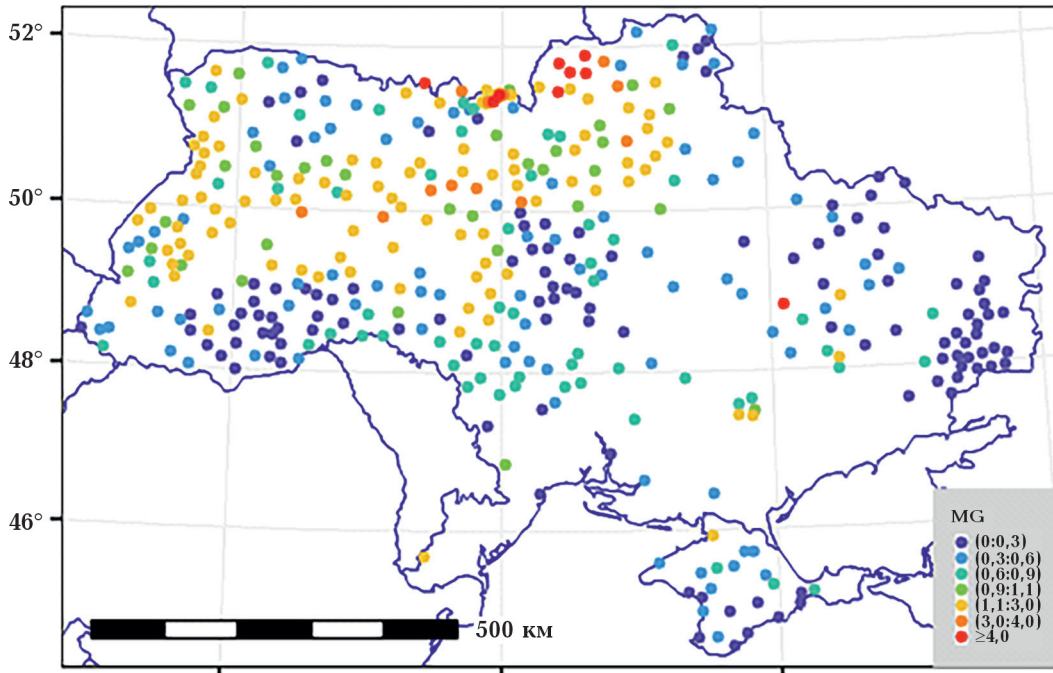
а



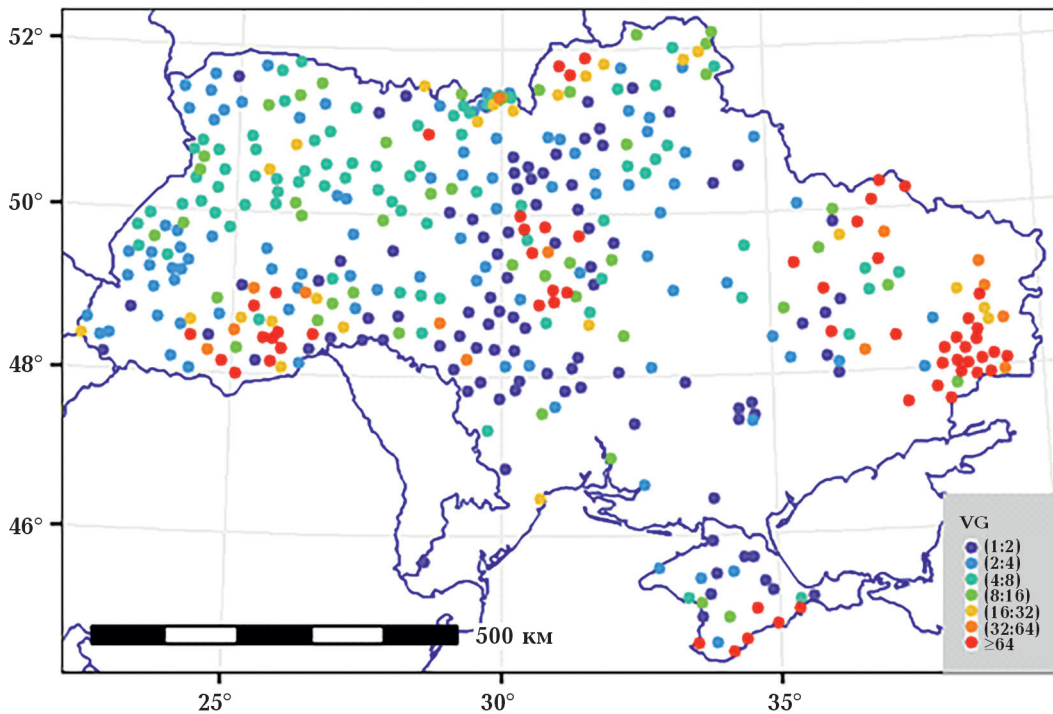
б

Рис. 3. Кількісні характеристики невизначеності результатів розрахунків поверхневої концентрації ^{137}Cs для кожної верифікаційної локації: *а* — різниця між максимальною та мінімальною концентрацією ^{137}Cs (в логарифмічному масштабі) отриманими в серії чисельних експериментів; *б* — середнє квадратичне (SD) відхилення розрахованих значень концентрації (в логарифмічному масштабі) отриманими в серії чисельних експериментів.

Fig. 3. Quantified uncertainty of the calculated ^{137}Cs contamination for each verification location: *a* — the difference between max and min surface ^{137}Cs concentration (in the logarithmic scale) obtained in the series of numerical experiments; *b* — the standard deviation (SD) of the ^{137}Cs concentration (in the logarithmic scale) calculated in the numerical experiments.



a



b

Рис. 4. Значення статистичних метрик для розрахованого радіоактивного забруднення ^{137}Cs у верифікаційних локаціях: а — середнє геометричне відхилення (MG); б — середня геометрична дисперсія (VG).
 Fig. 4. Statistical metrics of the calculated ^{137}Cs contamination values presented for each evaluation point: а — the mean geometric bias (MG); б — the mean geometric variance (VG).

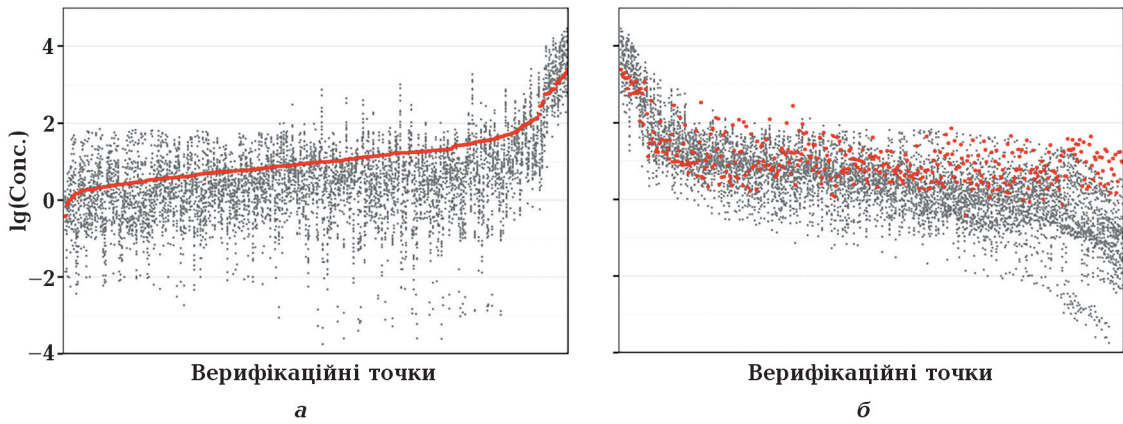


Рис. 5. Виміряні (червоний колір) та розраховані у чисельних експериментах (сірий колір) значення поверхневої концентрації ^{137}Cs для кожної верифікаційної локації: *a* — верифікаційні точки ранжовані у порядку зростання відповідних вимірених концентрацій; *б* — верифікаційні точки ранжовані у порядку зростання відстані до джерела викидів.

Fig. 5. The measured (red) and calculated (grey) values of the radioactive ^{137}Cs contamination presented for each verification point: *a* — verification points ranged in ascending order of the corresponding measured ^{137}Cs concentrations; *б* — verification points ranged in ascending order of the distance to the emission source.

діоактивного забруднення, які переважно були сформовані атмосферними опадами. Отже, можна ще раз констатувати певну кореляцію між величиною невизначеності розрахунків поверхневої концентрації ^{137}Cs і механізмом генерації локальних зон підвищеного забруднення за рахунок вологого вимивання радіоактивного аерозолі.

Наочне представлення невизначеності розрахованих значень поверхневого забруднення, джерелом якої є вхідна метеорологія, показано на рис. 5. Тут зображені виміряні та розраховані у всіх чисельних експериментах значення поверхневої концентрації ^{137}Cs для всіх верифікаційних точок, які попередньо були ранжовані відповідно до зростання вимірених значень радіоактивного забруднення (рис. 5, *a*) та відповідно до збільшення відстані до джерела викидів (рис. 5, *б*). Найменшу невизначеність (найменший розмах) виявлено для найбільших значень концентрацій ^{137}Cs (найближчі відстані до Чорнобильської АЕС). Із зменшення значень вимірених концентрацій (із збільшенням відстані до джерела викидів) невизначеність результатів розрахунків збільшується.

Висновки. Отримані результати показують наскільки важливою є вхідна метеорологічна інформація для моделювання

атмосферної дисперсії та прогнозування/оцінювання поверхневого радіоактивного забруднення місцевості. Навіть у випадку використання певною мірою уніфікованих глобальних 3D даних (атмосферних реаналізів) та однієї і тієї ж метеорологічної моделі, залежно від використаної версії вхідної метеорології, в одних і тих самих просторових локаціях змодельовані поверхневі концентрації радіоактивних домішок можуть відрізнятися більше ніж на чотири порядки величини (тобто у 10 000 разів!).

Зокрема, для розглянутого випадку чорнобильських радіоактивних забруднень найменша невизначеність (чутливість результатів розрахунків до вхідних метеорологічних даних) спостерігається вздовж південного радіоактивного сліду, який був сформований здебільшого за рахунок процесів сухого вимивання. Найбільша невизначеність — у зоні підвищеної поверхневої концентрації у Донецькій та Луганській областях, сформованої переважно за рахунок атмосферних опадів (вологого вимивання). Проте, вказана максимальна невизначеність не обов'язково пов'язана тільки із більшою невизначеністю прогностичної моделі WRF у відтворенні поля опадів. Можливий випадок, коли

опади моделюються коректно, проте розрахунок траєкторій переміщення забруднених повітряних мас розрахований неточно, що в сукупності може призводити до неправильного розрахунку поверхневої концентрації.

Спостерігається певна тенденція зростання невизначеності результатів розрахунків залежно від відстані до джерела. Проте є винятки, коли на значних відстанях (наприклад, у південному сліду) отриманні результати майже однакові при всіх

використаних версіях/реалізаціях метеорологічних даних. Невизначеність відтворення певного радіоактивного сліду залежить також від фізичного механізму його генерації: для зон забруднення, сформованих атмосферними опадами вона значно вища.

Роботу було виконано за часткової підтримки програми стипендій Universities for Ukraine волонтерського фонду Science4Ukraine та Yale School of the Environment.

Список літератури

- Скриник О.Я., Грицюк Ю.Я. Механізм формування крупномасштабної «плямовидної» структури забруднення місцевості потужним газо-аерозольним викидом в граничному шарі атмосфери. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 4. С. 191—198.
- Волощук В.М., Скриник О.Я., Грицюк Ю.Я. Механізм формування крупномасштабної «плямовидної» структури забруднення підстилаючої поверхні потужним газо-аерозольним викидом в нижній частині атмосфери. *Доп. НАН України.* 2007. № 4. С. 115—120.
- Arnold, D., Maurer, C., Wotawa, G., Draxler, R., Saito, K., & Seibert, P. (2015). Influence of the meteorological input on the atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 212—225. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.013>.
- De Cort, M., Dubois, G., Fridman, Sh.D., Gemenchuk, M.G., Izrael, Yu.A., Janssens, A., Jones, A.R., Kelly, G.N., Kvasnikova, E.V., Matveenko, I.I., Nazarov, I.M., Pokumeiko, Yu.M., Sitak, V.A., Stukin, E.D., Tabachny, L.Ya., Tsaturov, Yu.S., & Avdyushin, S.I. (1998). *Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident*. Luxembourg, Office for Official Publication of the European Communities.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Jaa, S., Järvinen, M., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553—597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Draxler, R.R., Arnold, D., Chino, M., Galmarini, S., Hort, M., Jones, A., Leadbetter, S., Malo, A., Maurer, C., Rolph, G., Saito, K., Servranckx, R., Shimbori, T., Solazzo, E., & Wotawa, G. (2013). World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 172—184. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.09.014>.
- Giaiotti, D., Oshurok, D., & Skrynyk, O. (2018). The Chernobyl nuclear accident Cs-137 cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. *Atmospheric Pollution Research*, 9(3), 502—512. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de

- Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*, 1999—2049. <http://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., **Ropelewski, C.**, **Wang, J.**, Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *77*, 437—471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYR P>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYR P>2.0.CO;2).
- Khalchenkov, A., & Kovalets, I. (2021). Evaluation of Spectral/Grid Nudging Methods for Weather Analysis and Forecasting in Kyiv Region with the Use of WRF Mesoscale Meteorological Model. In S. Shkarlet, A. Morozov, A. Palagin, (Eds.), *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)* (Vol. 1265, pp. 13—23). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_2.
- Kovalets, I.V., **Asker, C.**, **Kchalchenkov, A.V.**, **Persson, C.**, & Lavrova, T.V. (2017). Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*, *172*, 173—190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.025>.
- Leadbetter, S.L., Hort, M.C., Jones, A.R., Webster, H.N., & Draxler, R.R. (2015). Sensitivity of the modelled deposition of Caesium-137 from the Fukushima Daiichi nuclear power plant to the wet deposition parameterization in NAME. *Journal of Environmental Radioactivity*, *139*, 200—211. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.018>.
- Leelóssy, A., Lagzi, I., Kovács, A., & Mészáros, R. (2018). A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*, *182*, 20—33. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.009>.
- Lo, J.C.F., Yang, Z.L., & Pielke, R.A. (2008). Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the weather research and forecasting (WRF) model. *Journal of Geophysical Research*, *113*, D09112. <https://doi.org/10.1029/2007JD009216>.
- Miguez-Macho, G., Stenchikov, G.L., & Robock, A. (2004). Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *Journal of Geophysical Research*, *109*, D13104. <https://doi.org/10.1029/2003JD004495>.
- Mosca, S., Graziani, G., Klug, W., Bellasio, R., & Bianconi, R. (1998). A statistical methodology for the evaluation of long-range dispersion models: an application to the ETEX exercise. *Atmospheric Environment*, *32*(24), 4307—4324. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00179-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00179-4).
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woolen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*, 1015—1057. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E., & Yamartino, R.J. (2000a). *A user's guide for the CALMET meteorological model Version 5*. Earth Tech Inc., Concord, MA.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., & Yamartino, R.J. (2000b). *A user's guide for the CALPUFF (Version 5) dispersion model*. Earth Tech Inc, Concord, MA.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Wu, Z.-X., Klausmann, A., Popovic, E. (2012). Assessment of EPA's ETEX evaluation study. *10th Conference of Air Quality Models, March 14—16, 2012, RTP, North Carolina*.
- Skamarock, W.C., & Klemp, J.B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, *227*(7), 3465—3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>.

- Skrynyk, O., Voloshchuk, V., Budak, I., & Bubin, S. (2019). Regional HYSPLIT simulation of atmospheric transport and deposition of the Chernobyl ^{137}Cs releases. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6), 1953—1963. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.001>.
- Talerko, N. (2005). Mesoscale modeling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78(3), 311—329. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.04.008>.
- Talerko, M., Kovalets, I., Lev, T., Igarashi, Y., & Romanenko, O. (2021). Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wild land fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 193—204. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010>.
- Voloshchuk, V.M., & Shkvorets, O.Yu. (1993). Possible influence of meteorological conditions and changes aerosol source parameters on the spot structure formation of ground radioactive contamination. *Journal of Aerosol Science*, 24(1), 531. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(93\)90358-G](https://doi.org/10.1016/0021-8502(93)90358-G).
- WRF. (2015). *WRF Physics Use Survey*. Retrieved from https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/wrf_physics_survey.pdf.
- WRF. (2019). *Weather Research & Forecasting Model*. ARW. Version 4. Modeling System User's Guide.

Numerical simulation of the radioactive contamination of Ukraine after the Chornobyl disaster: the influence of the input meteorological data on the results uncertainty

O.Y. Skrynyk¹, S.M. Bubin², 2023

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute SES of Ukraine and NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Department of Physics, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

In this article we assess the sensitivity of the numerical simulations of the radioactive ^{137}Cs contamination of Ukraine caused by the Chornobyl nuclear power plant accident in 1986 to the input meteorological data. The atmospheric transport, dispersion, and deposition (dry scavenging and rain washout) of the radioactive aerosols was simulated using the CALPUFF dispersion model. The source parameterization of the ^{137}Cs emissions during the active phase of the catastrophe (26 April—May 5 of 1986) was adopted from the previously published literature results. Seventeen different versions/realizations of the input meteorology for CALPUFF simulations were prepared with the regional prognostic meteorological model WRF by combining the available global atmospheric reanalyses for 1986 (NNRP, ERA-Interim, ERA5, CFSR) and the model's physical parameterizations (microphysics, radiation processes, boundary/surface layer physics). The assessment of the simulation uncertainty was carried out in two different ways. In the first approach, the uncertainty was estimated as the width of the distribution of the calculated ^{137}Cs surface concentrations (adjusted to the logarithmic scale), which were obtained with different versions of the input meteorology. The second approach was based on the statistical comparison of the calculated ^{137}Cs contaminations and the corresponding measured values obtained during a complex assessment of the aftermath of the disaster made at the beginning of 1990s. Two statistical metrics were used: the geometric mean bias and the geometric mean variance. The results of our study demonstrate that even when using somewhat unified meteorological data (atmospheric reanalysis), the results of the radioactive contamination calculations at the same spatial locations can differ by several orders of magnitude. We find that the uncertainty depends not only on the distance to the source of the emissions

but also on the physical mechanism (wet or dry deposition) responsible for the formation of the local contamination.

Key words: Chernobyl disaster, radioactive contamination, ^{137}Cs , atmospheric transport and dispersion, wet and dry deposition, numerical simulation, uncertainty, WRF, CALPUFF.

References

- Skrynyk, O.Ya., & Hrytsyuk, Yu.Ya. (2007). Mechanism of forming a large scale «spot-like» structure of polluted area by powerful gas-aerosol source within the boundary layer of the atmosphere. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 29(4), 191—198 (in Ukrainian).
- Voloshchuk, V.M., Skrynyk, O.Ya., & Hrytsyuk, Yu.Ya. (2007). A mechanism of the formation of a large-scale spot-like pollution structure of the underlying surface under intense aerosol injections into the atmospheric boundary layer. *Dopovidi NAN Ukrainy*, (4), 115—120 (in Ukrainian).
- Arnold, D., Maurer, C., Wotawa, G., Draxler, R., Saito, K., & Seibert, P. (2015). Influence of the meteorological input on the atmospheric transport modelling with FLEXPART of radionuclides from the Fukushima Daiichi nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 212—225. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.02.013>.
- De Cort, M., Dubois, G., Fridman, Sh.D., Germenchuk, M.G., Izrael, Yu.A., Janssens, A., Jones, A.R., Kelly, G.N., Kvasnikova, E.V., Matveenko, I.I., Nazarov, I.M., Pokumeiko, Yu.M., Sitak, V.A., Stukin, E.D., Tabachny, L.Ya., Tsaturov, Yu.S., & Avdyushin, S.I. (1998). *Atlas of caesium deposition on Europe after the Chernobyl accident*. Luxembourg, Office for Official Publication of the European Communities.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A.C.M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., & Vitart, F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553—597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
- Draxler, R.R., Arnold, D., Chino, M., Galmarini, S., Hort, M., Jones, A., Leadbetter, S., Malo, A., Maurer, C., Rolph, G., Saito, K., Servranckx, R., Shimbori, T., Solazzo, E., & Wotawa, G. (2013). World Meteorological Organization's model simulations of the radionuclide dispersion and deposition from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 172—184. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.09.014>.
- Giaiotti, D., Oshurok, D., & Skrynyk, O. (2018). The Chernobyl nuclear accident Cs-137 cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. *Atmospheric Pollution Research*, 9(3), 502—512. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S., & Thépaut, J.N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999—2049. <http://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., & Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437—471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:TNYR P>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYR P>2.0.CO;2).
- Khalchenkov, A., & Kovalets, I. (2021). Evaluation of Spectral/Grid Nudging Methods for Weather Analysis and Forecasting in Kyiv

- Region with the Use of WRF Mesoscale Meteorological Model. In S. Shkarlet, A. Morozov, A. Palagin, (Eds.), *Mathematical Modeling and Simulation of Systems (MODS'2020)* (Vol. 1265, pp. 13—23). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58124-4_2.
- Kovalets, I.V., Asker, C., Kchalchenkov, A.V., Persson, C., & Lavrova, T.V. (2017). Atmospheric dispersion of radon around uranium mill tailings of the former Pridneprovsky Chemical Plant in Ukraine. *Journal of Environmental Radioactivity*, 172, 173—190. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.03.025>.
- Leadbetter, S.L., Hort, M.C., Jones, A.R., Webster, H.N., & Draxler, R.R. (2015). Sensitivity of the modelled deposition of Caesium-137 from the Fukushima Daiichi nuclear power plant to the wet deposition parameterization in NAME. *Journal of Environmental Radioactivity*, 139, 200—211. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.03.018>.
- Leelőssy, A., Lagzi, I., Kovács, A., & Mészáros, R. (2018). A review of numerical models to predict the atmospheric dispersion of radionuclides. *Journal of Environmental Radioactivity*, 182, 20—33. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.11.009>.
- Lo, J.C.F., Yang, Z.L., & Pielke, R.A. (2008). Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the weather research and forecasting (WRF) model. *Journal of Geophysical Research*, 113, D09112. <https://doi.org/10.1029/2007JD009216>.
- Miguez-Macho, G., Stenchikov, G.L., & Robock, A. (2004). Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *Journal of Geophysical Research*, 109, D13104. <https://doi.org/10.1029/2003JD004495>.
- Mosca, S., Graziani, G., Klug, W., Bellasio, R., & Bianconi, R. (1998). A statistical methodology for the evaluation of long-range dispersion models: an application to the ETEX exercise. *Atmospheric Environment*, 32(24), 4307—4324. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00179-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00179-4).
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.-L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woolen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y.-T., Chuang, H.-Y., Juang, H.-M., Sela, J., Iredell, M., Treadon, R., Kleist, D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, J., Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, R., Lord, S., Dool, H., Kumar, A., Wang, W., Long, C., Chelliah, M., Xue, Y., Huang, B., Schemm, J.-K., Ebisuzaki, W., Lin, R., Xie, P., Chen, M., Zhou, S., Higgins, W., Zou, C.-Z., Liu, Q., Chen, Y., Han, Y., Cucurull, L., Reynolds, R.W., Rutledge, G., & Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91, 1015—1057. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1>.
- Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E., & Yamartino, R.J. (2000a). *A user's guide for the CALMET meteorological model Version 5*. Earth Tech Inc., Concord, MA.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., & Yamartino, R.J. (2000b). *A user's guide for the CALPUFF (Version 5) dispersion model*. Earth Tech Inc, Concord, MA.
- Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Wu, Z.-X., Klausmann, A., Popovic, E. (2012). Assessment of EPA's ETEX evaluation study. *10th Conference of Air Quality Models, March 14—16, 2012, RTP, North Carolina*.
- Skamarock, W.C., & Klemp, J.B. (2008). A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465—3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>.
- Skrynyk, O., Voloshchuk, V., Budak, I., & Bubin, S. (2019). Regional HYSPLIT simulation of atmospheric transport and deposition of the Chernobyl 137Cs releases. *Atmospheric Pollution Research*, 10(6), 1953—1963. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.001>.
- Talerko, N. (2005). Mesoscale modeling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 78(3), 311—329. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.04.008>.
- Talerko, M., Kovalets, I., Lev, T., Igarashi, Y., & Romanenko, O. (2021). Simulation study of radionuclide atmospheric transport after wild land fires in the Chernobyl Exclusion Zone in April 2020. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 193—204. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.010>.

- Voloshchuk, V.M., & Shkvorets, O.Yu. (1993). Possible influence of meteorological conditions and changes aerosol source parameters on the spot structure formation of ground radioactive contamination. *Journal of Aerosol Science*, 24(1), 531. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(93\)90358-G](https://doi.org/10.1016/0021-8502(93)90358-G).
- WRF. (2015). *WRF Physics Use Survey*. Retrieved from https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/wrf_physics_survey.pdf.
- WRF. (2019). *Weather Research & Forecasting Model. ARW. Version 4. Modeling System User's Guide*.