

УДК 504.3.054 + 539.16 + 551.509.313

М. М. Талерко¹, Т. Д. Лев¹, В. В. Дроздович², С. В. Масюк³✉

¹Інститут проблем безпеки АЕС Національної академії наук України, вул. Лисогірська, 12, м. Київ, 03028, Україна

²Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, NIH, DHHS, 9609 Medical Center Drive, Bethesda, MD 20892-9778, USA

³Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України», вул. Юрія Іллєнка, 53, м. Київ, 04050, Україна

РЕКОНСТРУКЦІЯ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ ЙОДОМ-131 В ПОЧАТКОВИЙ ПЕРІОД ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АВАРІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ WRF

Мета: виконати реконструкцію динаміки випадань ¹³¹I та їхніх об'ємних концентрацій у повітрі в гострий період Чорнобильської аварії в населених пунктах України за допомогою мезомасштабної моделі атмосферного перенесення радіонуклідів LEDI з використанням результатів розрахунків чисельної моделі прогнозу погоди WRF в якості вхідної метеорологічної інформації; порівняти отримані результати з результатами попередньої реконструкції та наявними даними вимірювань забруднення ґрунту.

Об'єкт дослідження: нижній шар атмосфери і земна поверхня території України, радіоактивно забруднені внаслідок Чорнобильської аварії.

Матеріали та методи дослідження. За допомогою лагранжово-ейлерової дифузійної моделі LEDI проведено моделювання розповсюдження ¹³¹I в атмосфері на території України та його осадження на земну поверхню в початковий період Чорнобильської аварії. Вхідними даними для моделі атмосферного перенесення були результати обчислень деталізованих полів метеорологічних параметрів з використанням мезомасштабної моделі прогнозу погоди WRF, адаптованої для території України.

Результати. На основі результатів моделювання атмосферного перенесення радіоактивних викидів з аварійного блоку ЧАЕС з використанням сучасної мезомасштабної моделі чисельного прогнозу погоди WRF розраховано добові випадання та середньодобові об'ємні активності ¹³¹I в приземному шарі повітря за період з 26 квітня по 7 травня 1986 року для 30 352 населених пунктів всіх областей України, включаючи 1263 населених пункти в Київській, 1717 – в Житомирській та 1570 – в Чернігівській областях.

Висновки. Показано, що метод математичного моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів, поєднаний з використанням сучасної мезомасштабної моделі чисельного прогнозу погоди WRF, є корисним інструментом для детальної реконструкції динаміки полів радіоактивного забруднення повітря і земної поверхні в гострий період Чорнобильської аварії. Уточнена та розширена за кількістю населених пунктів база модельних значень добових випадань та середньодобових значень об'ємної активності ¹³¹I в приземному повітрі може бути використана в задачі реконструкції доз опромінення щитоподібної залози населення України.

Ключові слова: аварія на Чорнобильській АЕС, йод-131, моделювання атмосферного перенесення.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2020. Вип. 25. С. 285–299. doi: 10.33145/2304-8336-2020-25-285-299

✉ Масюк Сергій Володимирович, e-mail: masja1979@gmail.com

М. М. Talerko¹, Т. D. Lev¹, V. V. Drozdovitch², S. V. Masiuk³✉

¹*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine, 12 Lysogirska St., Kyiv, 03028, Ukraine*

²*Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, NIH, DHHS, 9609 Medical Center Drive, Bethesda, MD 20892, USA*

³*State Institution «National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine», 53 Yuriia Illienka St., Kyiv, 04050, Ukraine*

RECONSTRUCTION OF THE RADIOACTIVE CONTAMINATION OF THE TERRITORY OF UKRAINE BY IODINE-131 DURING INITIAL PERIOD OF THE CHORNOBYL ACCIDENT USING THE RESULTS FROM NUMERICAL MODEL WRF

Objective. To reconstruct the ¹³¹I activity concentrations in air and ¹³¹I ground deposition densities from 26 April to 7 May 1986 from the radioactivity release after the Chornobyl accident in the settlements of Ukraine using the mesoscale radionuclides atmospheric transport model LEDI and meteorological information from the numerical weather forecast model WRF and to compare the obtained results with those calculated previously as well as with available measurements of ¹³¹I activity in soil.

Object of research: the near-ground layer of the atmosphere and the surface of the territory of Ukraine radioactively contaminated as a result of the Chornobyl accident.

Materials and methods of research. The dispersion of ¹³¹I in the atmosphere and deposition on the ground surface in Ukraine were calculated using the Lagrangian-Eulerian diffusion model LEDI. The detailed fields of meteorological parameters calculated using the mesoscale weather forecast model WRF, which was adapted for the territory of Ukraine, were used as input data for the LEDI model.

Results. The ¹³¹I daily-average activity concentrations in the surface air and ¹³¹I daily ground deposition densities from 26 April to 7 May 1986 were calculated using the up-to-date mesoscale model of numerical weather forecast WRF for 30,352 settlements in entire Ukraine, including 1,263 settlements in Kyiv, 1,717 – in Zhytomyr and 1,570 – in Chernihiv Oblasts.

Conclusions. The method of mathematical modeling of the atmospheric transport of the radionuclides is combination with the up-to-date mesoscale model of numerical weather forecast WRF is a useful tool for reconstruction of radioactive contamination of the air and the ground surface after the Chornobyl accident. Calculated in this study ¹³¹I activity concentrations in air and ¹³¹I ground deposition densities were used to reconstruct the thyroid doses due to ¹³¹I intake to the population of Ukraine.

Key words: Chornobyl accident, Iodine-131, atmospheric transport model.

Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2020;25:285-299. doi: 10.33145/2304-8336-2020-25-285-299

ВСТУП

Методи математичного моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивних викидів з аварійного блоку Чорнобильської АЕС в 1986 г. є важливою складовою задачі ретроспективної реконструкції доз опромінення населення, що мешкає (чи мешкало раніше) на радіоактивно забруднених територіях. Їхнє значення зростає для задач оцінки внеску короткоіснуючих радіонуклідів (в першу чергу йоду-131) у формування доз опромінення щитоподібної залози населення України, що пов'язано з відсутністю достатньої кількості даних прямих вимірювань

INTRODUCTION

The method of mathematical modeling of the atmospheric transport of radioactivity released from the destroyed Unit 4 of the Chornobyl nuclear power plant (NPP) is an important component in the problem of retrospective assessment of radiation doses to the population affected by the accident. Such modeling is especially important for the assessment of thyroid doses due to intake of radioiodine isotopes, primarily Iodine-131 (¹³¹I), to the population of Ukraine due to the lack of measurements of ¹³¹I activity concentrations in air,

✉ Bogdan I. Gerashchenko, e-mail: biger63@yahoo.com

радіоактивного забруднення ^{131}I у повітрі, на поверхні ґрунту та в продуктах харчування у перші тижні аварії.

У [1, 2] представлено результати реконструкції динаміки випадань ^{137}Cs та ^{131}I на території України за допомогою регіональної лагранжово-ейлерової моделі атмосферного перенесення радіонуклідів LEDI. У цих роботах було створено розрахункову базу даних середньодобових значень активності ^{137}Cs та ^{131}I у повітрі та щільностей добових випадань цих радіонуклідів на поверхню ґрунту за період з 26 квітня по 7 травня 1986 р. у 12 715 населених пунктах України (розрахунки були виконані для усіх міст і селищ та лише для тих сіл, на території яких розташовувалась сільська рада). Дані були використані при проведенні загальнодозиметричної паспортизації населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії [3].

Для опису умов поширення радіоактивного викиду протягом початкового періоду аварії на Чорнобильській АЕС у якості вхідної метеорологічної інформації при моделюванні перенесення радіонуклідів у атмосфері були використані дані вимірювань гідрометеорологічної служби за період 26.04–07.05.1986 р., а саме: 1) дані вимірювань кількості атмосферних опадів на 197 метеостанціях України; 2) дані радіозондування атмосфери, що проводилося мережею аерологічних станцій (9 станцій на території України та найближчі в сусідніх країнах). При моделюванні атмосферного перенесення радіонуклідів проводилась просторово-часова інтерполяція даних метеорологічних вимірювань.

В останні роки в Україні з'явилася можливість використовувати сучасні моделі чисельного прогнозу погоди, які розраховують поля метеорологічних параметрів з високою деталізацією у просторі та часі, зокрема модель WRF, розроблену в Національному центрі атмосферних досліджень (NCAR) США [4]. Це відкрило можливості для ревізії отриманих раніше результатів модельних розрахунків полів радіоактивного забруднення навколишнього середовища в Україні внаслідок Чорнобильської аварії з метою їх уточнення. Головними перевагами нової версії реконструкції радіоактивного забруднення населених пунктів України в початковий період Чорнобильської аварії є:

1. Використання мезомасштабної моделі прогнозу погоди WRF для обчислень деталізованих полів метеорологічних параметрів як вхідних даних для моделі атмосферного перенесення радіонуклідів LEDI.
2. Використання нової версії моделі LEDI з удосконаленою параметризацією характеристик приземного шару атмосфери та модулем розрахунку поля вітру над земною поверхнею зі складною орографією [5].

soil and food during the first few weeks after the Chernobyl accident.

The regional Lagrangian-Eulerian model LEDI of the atmospheric transport of the radionuclides was used to reconstruct the ^{137}Cs and ^{131}I ground deposition densities in Ukraine [1, 2]. The daily-average activity concentrations in the air and daily ground deposition densities of ^{137}Cs and ^{131}I from 26 April to 7 May 1986 (the period of major deposition of radioactivity) were calculated for 12,715 settlements in Ukraine (that calculation was made for all cities and towns and only for large villages that have a village council). These data were used for the dosimetry classification of the Ukrainian settlements that were radioactively contaminated after the Chernobyl accident [3].

The following meteorological information provided by the Hydrometeorological Service of the former USSR was used in modeling the atmospheric transport of the radionuclides: 1) data on precipitation at 197 meteorological stations of Ukraine; 2) atmospheric radiosounding data obtained by a network of 9 aerological stations on the territory of Ukraine and in neighboring countries. Spatial and temporal interpolation of meteorological data was performed during the simulation of atmospheric transport of the radionuclides.

The Weather Research and Forecasting (WRF) model, which was developed by the U.S. National Center for Atmospheric Research [4], became available recently in Ukraine. This model provides numerical weather forecasting that calculates the fields of meteorological parameters with high detail in space and time. It enabled to revise the previously obtained results of calculations of the radioactive contamination of Ukraine. The main advantages of the revision were as follows:

1. Using the mesoscale weather forecast model WRF to calculate the detailed fields of meteorological parameters that were used as input data for the atmospheric transport model LEDI.
2. Using an improved version of the LEDI model, including the updated parameterization of the atmospheric boundary layer characteristics and a block for calculation of the wind over a complex terrain [5].

3. Реконструкція радіоактивного забруднення для всіх населених пунктів (НП) України станом на 1986 р. [6] (30353 НП проти 12715 НП в старій версії).

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Виконати реконструкцію динаміки випадань ^{131}I та їхніх об'ємних концентрацій у повітрі в гострий період Чорнобильської аварії в населених пунктах України за допомогою мезомасштабної моделі атмосферного перенесення радіонуклідів LEDI з використанням результатів розрахунків чисельної моделі прогнозу погоди WRF в якості вхідної метеорологічної інформації; порівняти отримані результати з результатами попередньої версії реконструкції та наявними даними вимірювань забруднення ґрунту.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

В даній роботі вхідною метеорологічною інформацією для моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів Чорнобильського викиду є результати розрахунків чисельної моделі прогнозу погоди WRF-ARW (актуальна версія моделі V3.9.1). Головними перевагами є використання полів метеорологічних параметрів, обчислених за допомогою моделі WRF, в порівнянні з простою інтерполяцією даних прямих метеорологічних спостережень [1, 2], є:

1. Застосування такої моделі дозволяє точніше відтворювати атмосферні процеси на дрібних часо-просторових масштабах — з роздільністю 10 км у просторі по горизонталі та 1 година у часі. Це дає можливість більш детально враховувати вплив структури атмосферних вихорів з горизонтальними розмірами порядку десятків-сотень кілометрів (циклонічні або антициклонічні утворення), а також областей з високими просторовими градієнтами метеополів (наприклад, атмосферні фронти). При звичайній інтерполяції даних радіозондування атмосфери [1, 2] (середня відстань між станціями ~ 250 км, періодичність вимірювань 6 год) впливом атмосферних процесів меншого масштабу фактично нехтується.

2. При використанні даних прямих вимірювань характеристики приземного шару атмосфери, які визначають інтенсивність турбулентної дифузії радіонуклідів, оцінюються за допомогою спрощених емпіричних співвідношень. Модель WRF розраховує їх на основі розв'язання системи рівнянь термодинаміки атмосфери, що, відповідно, підвищує якість подальших розрахунків атмосферного перенесення домішок.

3. Reconstruction of radioactive contamination for all settlements of Ukraine as at 1986 [6]: 30,352 settlements vs. 12,715 considered previously.

OBJECTIVE

To reconstruct the concentrations ^{131}I activity in the air and ^{131}I ground deposition densities during the initial period of the Chornobyl accident (from 26 April to 7 May 1986) in the settlements of Ukraine using the mesoscale model LEDI of atmospheric transport of radionuclides and meteorological information from the numerical weather forecast model WRF and to compare the obtained results with those calculated previously as well as with available measurements of ^{131}I activity in soil.

MATERIALS AND METHODS

The results of calculations of the numerical weather forecast model WRF-ARW (Advanced Research WRF, version V3.9.1) were used as the input meteorological information for modeling of atmospheric transport of the radionuclides released from the Chornobyl NPP. The main reasons for the significant advantages of using the fields of meteorological parameters calculated using the WRF model, compared with the simple interpolation of data from direct meteorological observations [1, 2], are:

1. The use of the model allows more accurate reproduction of atmospheric processes on a small temporal-spatial scale — with a resolution of 10 km in space horizontally and 1 hour in time. This makes it possible to take into account in more detail the impact of the structure of atmospheric vortices with horizontal dimensions of tens to hundreds of kilometers (cyclonic or anticyclonic formations), as well as areas with high spatial gradients of meteorological fields (e.g. atmospheric fronts). When using a simple interpolation of atmospheric radiosounding data [1, 2] (average distance between stations is about 250 km, frequency of measurements is 6 hours), the influence of small-scale atmospheric processes is actually neglected.

2. When using direct measurement data, the characteristics of the atmospheric boundary layer, which determine the intensity of turbulent diffusion of radionuclides, are estimated on the base of simplified empirical relationships. The WRF model calculates them based on the solution of the system of equations of thermohydrodynamics of the atmosphere, which, accordingly, improves the quality of following calculations of atmospheric transport of radionuclides.

При цьому потрібно зазначити, що у випадку відносно стабільних погодних умов (з невеликими просторовими і часовими градієнтами метеопараметрів) різниця в результатах обох підходів може бути мінімальною. Значні відмінності виникають насамперед для тих регіонів, де у відповідний період часу відбувається швидка перебудова полів вітру і температури під впливом загальних атмосферних процесів синоптичного масштабу.

Модель WRF дає можливість прогнозування зі справджуваністю 70-90 %, і, в тому числі, може успішно застосовуватися для прогнозування екстремальних метеорологічних ситуацій (сильний вітер, зливові опади). Модель можна адаптувати до конкретних фізико-географічних умов даного регіону за рахунок вибору користувачем методів параметризації її основних блоків: інтенсивності турбулентності, мікрофізичних процесів в атмосфері, довгохвильової радіації, планетарного приземного шару, опису типів земної поверхні. Версія моделі WRF, встановлена в Інституті проблем безпеки АЕС НАНУ, була адаптована для географічних умов України шляхом включення в розрахунки додаткової інформації про властивості земної поверхні, зокрема про типи ґрунтів та види рослинності.

З використанням програмного засобу WRF-portal була сформована чисельна розрахункова сітка для модельних розрахунків (крок сітки по горизонталі – 10 км, кількість вузлів – 247×211), яка покривала територію центральної Європи, включаючи Україну та Білорусь (рис. 1). Вертикальна роздільність моделі – 28 рівнів по висоті; мінімальний вертикальний крок сітки біля по-

It should be noted that in the case of relatively stable weather conditions (with small spatial and temporal gradients of meteorological parameters), the difference in the results of both approaches may be minimal. Significant differences arise primarily for those regions where in the relevant period of time there is a rapid restructuring of wind and temperature fields under the influence of general atmospheric processes of synoptic scale.

The WRF model provides weather forecast with an accuracy of 70-90%, including extreme weather situations, such as strong winds and heavy rainfall. The model can be adapted to specific physical and geographical conditions of the region using choice of parameterization methods: turbulence intensity, microphysical processes in the atmosphere, long-wave radiation, atmospheric boundary layer and earth surface types. The version of the WRF model, which was used in this study, was adapted to the geographical conditions of Ukraine by including additional information on soil and vegetation types.

Using the WRF-portal software, a numerical calculation grid for simulations was formed with horizontal grid step of 10 km and number of grid cells was 247×211 ; it covered the territory of Central Europe, including Ukraine and Belarus (See Fig. 1). Vertical resolution of the model was 28 levels in height; the minimal vertical grid step

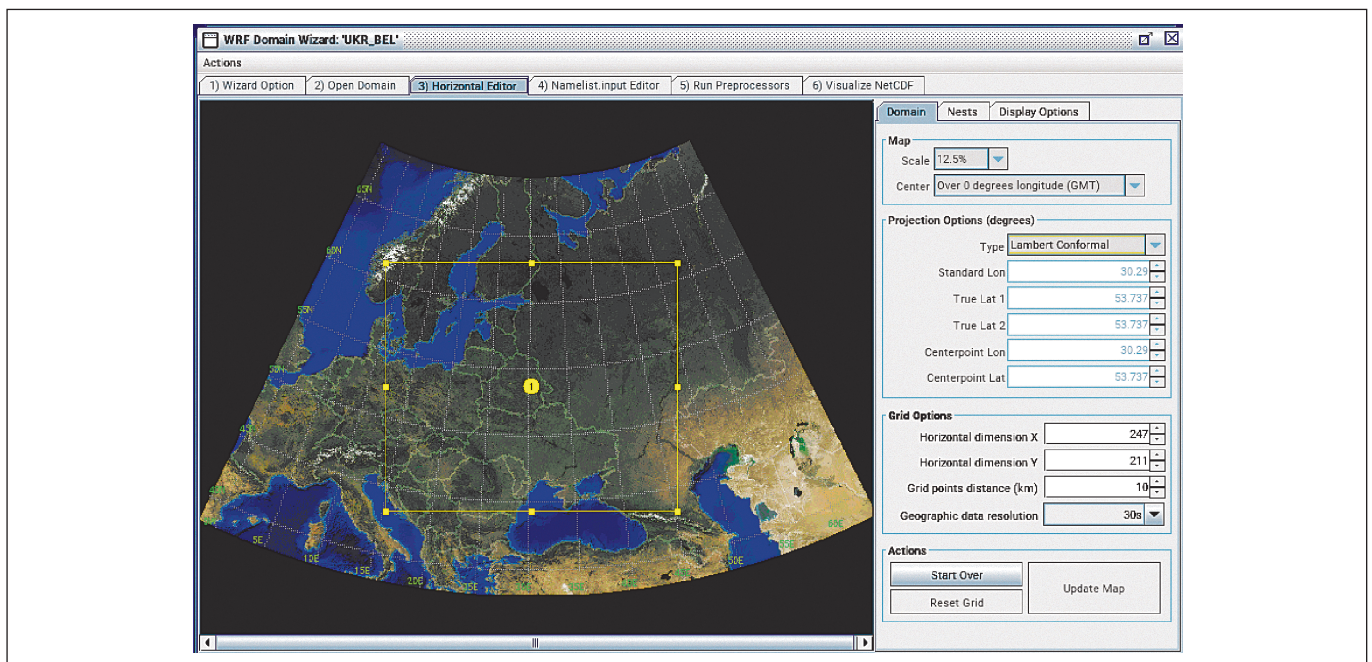


Рисунок 1. Розрахункова область моделі чисельного прогнозу погоди WRF

Figure 1. Calculation area of the WRF numerical weather forecast model

верхні Землі ~ 50 м. Для розрахунків метеополів на вказаній «дрібній» 10-кілометровій сітці модель WRF-ARW як вхідну інформацію використовує результати проекту реаналізу глобальних даних міжнародної метеорологічної мережі ERA-Interim (реаналіз даних про атмосферу Землі) [7]. Проект проводить глобальний атмосферний реаналіз аеросиноптичних даних з 1979 року по теперішній час, який постійно оновлюється в режимі реального часу. Кожна нова версія реаналізу використовує інформацію, надану системою засвоєння даних (модель та аналіз), а також дані метеорологічних спостережень. Реаналіз даних проводився за допомогою моделі ECMWF (Європейський центр середньострокових прогнозів погоди, Великобританія), яка є однією з найбільш високо оцінених для метеорологічного прогнозування. Просторова роздільність набору даних дорівнює приблизно 80 км по горизонталі на 60 вертикальних рівнях від поверхні Землі до рівня 0,1 гПа.

Результати розрахунків WRF метеорологічних полів швидкості вітру, температури повітря, атмосферного тиску, кількості опадів, висоти приземного шару атмосфери, динамічної швидкості та параметру шорсткості підстильної поверхні на період з 26 квітня по 07 травня 1986 р. з кроком у часі 1 год. передавались для моделі атмосферного перенесення LEDI. Моделювання розповсюдження радіонуклідів в атмосфері та їх осадження на земну поверхню в початковий період Чорнобильської аварії для території України проводилось за допомогою лагранжово-ейлерової дифузійної моделі LEDI. Модель розраховує перенесення газоаерозольних викидів від джерела з ефективною висотою викидів до 1500 м для різних його типів за тривалістю викидів (залповий, скінченного часу дії, неперервний) на відстані до 1000 км. Вона може використовуватися для розрахунків розповсюдження багатокомпонентної домішки з різними фізико-хімічними властивостями (гази, включаючи йод в різних хімічних формах; аерозолі з довільним розподілом частинок за розмірами). Модель дозволяє розраховувати розповсюдження домішки в нестационарних та горизонтально неоднорідних метеорологічних полях в умовах неоднорідності підстильної поверхні (з урахуванням рельєфу місцевості та неоднорідного рослинного покриву на ній).

Розрахунки атмосферного перенесення та осадження ^{131}I базувались на наступних положеннях:

1) Розглядався період інтенсивних радіоактивних викидів з аварійного реактора ЧАЕС, що обумовили формування поля радіоактивного забруднення території України, протягом 10 діб — з 26.04 по 05.05.1986 р.

near the ground surface was about 50 m. To calculate the meteorological fields on the specified «fine» 10-kilometer grid, the WRF-ARW model used the results of ERA-Interim [7] as input information. ERA-Interim is the project of reanalysis of global data of the international meteorological network. The project carries out global atmospheric reanalysis of aero-synoptic data from 1979 to the present, constantly updated in real time. Each new version of the reanalysis uses information provided by the data assimilation system (model and analysis), as well as meteorological observation data. Reanalysis of data was performed using the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, UK) model, which is one of the most highly estimated for meteorological forecasting. The spatial resolution of the data was approximately 80 km in a horizontal plane and at 60 vertical levels from the ground surface to the level of 0.1 hPa.

The results of WRF calculations of meteorological fields of wind speed, air temperature, atmospheric pressure, precipitation, height of the atmospheric boundary layer, the friction velocity and the surface roughness for the period from 26 April to 7 May 1986 with a time resolution of 1 h were used by the LEDI atmospheric transport model. Then, the radionuclides' dispersion in the atmosphere and their deposition on the ground surface were simulated using LEDI model. This model calculated the transport of radioactivity from a source with an effective release height of up to 1,500 m for various types of emissions duration (instantaneous, finite time, continuous) at a distance of up to 1,000 km. The model can be used to calculate the dispersion of a multicomponent pollutant with different physical and chemical properties, such as gases, including iodine in various chemical forms and aerosols with an arbitrary particle size distribution. The model LEDI enables to calculate the pollutant dispersion in time-variable and horizontally inhomogeneous meteorological fields over the inhomogeneous underlying surface with account to the terrain and types of vegetation.

Calculations of the ^{131}I atmospheric transport and deposition on the ground surface were done under the following assumptions:

1. The period of intensive radioactive release from the Chornobyl NPP emergency reactor, which formed the radioactive contamination field of Ukraine, was 10 days: from 26 April to 5 May 1986.

2) Неперервний викид протягом вказаного періоду моделювався послідовністю клубів з періодичністю 1 година.

3) Чорнобильське джерело розглядалося як об'ємне з максимальною висотою підйому, що варіює в часі залежно від метеорологічних умов і температури в аварійному реакторі. Вертикальний розподіл інтенсивності викиду задавався в 4 вузлах: на висотах 200, 500, 800 і 1200 м.

4) Швидкість сухого осадження ^{131}I задавалась рівною $7 \text{ мм} \cdot \text{сек}^{-1}$. Для розрахунків вологого осадження йоду-131 параметр вологого вимивання задавався пропорційним інтенсивності атмосферних опадів з коефіцієнтом пропорційності рівним $3.6 \cdot 10^{-5} \text{ год} \cdot \text{мм}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

Для розрахунків розповсюдження радіоактивних викидів над територією України було використано деталізований у часі сценарій викиду ^{131}I [2], що враховує варіації як інтенсивності викиду, так і висоти підйому радіоактивного струменя над реактором протягом всього періоду інтенсивних викидів.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Просторово-часові характеристики радіоактивного забруднення України

Результати модельних розрахунків відтворюють основні особливості динаміки формування полів радіоактивного забруднення території України в початковий період Чорнобильської аварії. Варіації напрямку перенесення 26 квітня 1986 р. обумовили широкий західний слід поля радіоактивних випадань, що охопив Житомирську, Рівненську, Волинську та частину Київської області. Протягом 27 та першої половини 28 квітня радіоактивні викиди переносилися в основному на північ на територію Білорусі. Починаючи з другої половини 28 квітня вітер в районі ЧАЕС змінився на південно-західний, що спричинило початок інтенсивного забруднення Чернігівської області та подальшого поширення радіоактивності на територію Білорусі та Росії. 29–30 квітня напрямок руху радіоактивно забруднених мас повітря над територією Росії змінився на південний, в результаті чого вони пройшли над східною частиною України і далі в напрямку Криму та півдня України. Вранці 30 квітня напрямок вітру в районі ЧАЕС змінився на південний, що зумовило радіоактивне забруднення центральної частини України, в тому числі м. Києва. Значний зсув напрямку вітру по висоті в межах нижнього шару атмосфери призвів до істотного «розщеплення» радіоактивно забруднених хмар, викинутих з аварійного блоку 30 квітня. Внаслідок цього частина активності, яка піднялася до висоти

2. Continuous release was modeled by a sequence of puffs with a frequency of 1 hour.

3. The source was considered to be volumetric with a maximum rise height that varied with time depending on meteorological conditions and temperature within the emergency reactor. The vertical distribution of the emission intensity was set at altitudes of 200, 500, 800 and 1200 m.

4. The dry deposition velocity of ^{131}I was $7 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. For calculation of ^{131}I wet deposition, the washout coefficient was set proportional to rainfall rate, and the proportionality coefficient was $3.6 \cdot 10^{-5} \text{ h} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$.

A time-detailed release scenario for ^{131}I was used to calculate the spread of radioactive releases over the territory of Ukraine [2] with taking into account variations in both the intensity of the release and the height of the rise of the radioactive jet over the reactor during the entire period of intensive emissions.

RESULTS AND DISCUSSION

Time and spatial characteristics of the radioactive contamination of Ukraine

The results of model calculations reproduced the main time and spatial characteristics of the radioactive contamination of the territory of Ukraine during first 12 days after the Chornobyl accident. Variations in the atmospheric transport direction during the first day after the accident, on 26 April 1986, caused a wide western trace of the radioactive fallout in western part of Kyiv Oblast and in Zhytomyr, Rivne and Volyn Oblasts. During 27 April and the first half of 28 April, the radioactive release was transported mainly to the territory of Belarus, to the north from the Chornobyl NPP. Starting from the second half of 28 April, the wind at the source area changed to southwestern that resulted in fallout over Chernihiv Oblast and further transport of radioactivity to the territory of Belarus and Russia. On 29–30 April, the direction of radioactively contaminated air masses movement over the territory of Russia changed to the south that resulted in contamination of the eastern and southern parts of Ukraine and Crimea. In the morning of 30 April, the wind direction in closed proximity to the Chornobyl NPP changed to the southward toward the central part of Ukraine, including Kyiv City. A large wind direction shear in height within the lower atmosphere led to a significant «splitting» of radioactively contaminated clouds released from the emergency unit on 30 April. As a result, the

1000 м і більше, була перенесена в південно-західному напрямку і зумовила радіоактивне забруднення в Чернівецькій і Хмельницькій областях. З 1 по 5 травня напрямок вітру продовжував змінюватися за годинниковою стрілкою, що зумовило формування великомасштабних плям радіоактивного забруднення в західній і південно-західній частинах України (Вінницька, Хмельницька та Чернівецька області). До 7 травня практично завершилося формування радіоактивних випадань на території України.

Формування поля радіоактивних випадань на території України відбувалося в основному за рахунок лише сухого осадження радіонуклідів на земну поверхню. Внесок механізму вологого вимивання в Україні був незначний, за винятком вологих випадань 28–29 квітня в деяких районах Чернігівської області, а також впливу слабких дощів в Житомирській (27 квітня), Сумській (30 квітня), Черкаській і Кіровоградській областях (1 травня).

Випадання йоду-131 в Україні

На основі результатів моделювання атмосферного перенесення радіоактивних викидів з аварійного блоку ЧАЕС створено оновлену версію бази модельних значень добових випадань та середньодобових значень об'ємної активності ^{131}I в приземному повітрі з метою її використання в задачі реконструкції доз опромінення щитоподібної залози населення України. База розрахункових даних містить результати моделювання за період з 26 квітня по 7 травня 1986 року для 30 352 населених пунктів всіх областей України, включаючи 1263 НП в Київській, 1717 НП – в Житомирській та 1570 НП – в Чернігівській областях. Внаслідок використання нового набору вхідної метеорологічної інформації результати модельних розрахунків траєкторій перенесення радіоактивно забруднених повітряних мас відрізняються від попередніх результатів (насамперед завдяки більш деталізованому опису поля вітру в нижньому шарі атмосфери) (рис. 2). При цьому відмінність результатів для двох наборів метеоданих виявилась суттєво різною залежно від дати викиду і конкретного регіону. Місця та дати найбільших відмінностей у траєкторіях фактично є індикатором найзначніших уточнень розповсюдження радіоактивних викидів внаслідок використання результатів моделі прогнозу погоди WRF у новій версії моделювання. Головною причиною таких відмінностей є уточнення характеристик атмосфери в деяких регіонах України в ті періоди, коли туди надходили радіоактивні викиди з

radioactivity on altitudes of 1,000 m and higher was transported to the south-western direction and caused radioactive contamination of Chernivtsi and Khmelnytsky Oblasts. The wind direction continued to change clockwise from 1 to 5 May that resulted in the formation of large-scale spots of radioactive contamination in the western and southwestern parts of Ukraine, in Vinnytsia, Khmelnytskyi and Chernivtsi Oblasts. The formation of radioactive contamination of the Ukrainian territory was practically completed by 7 May 1986.

The radioactive contamination of the territory of Ukraine was formed mainly due to the dry deposition of radionuclides. The contribution of the wet deposition was insignificant, except deposition with rain in some districts of Chernihiv Oblast on 28–29 April and with light rain in Zhytomyr Oblast on 27 April, Sumy Oblast on 30 April, Cherkasy and Kirovohrad Oblasts on 1 May.

Iodine-131 ground depositions in Ukraine

The ^{131}I daily-average activity concentrations in the surface air and ^{131}I daily ground deposition densities from 26 April to 7 May 1986 were calculated using updated version of atmospheric transport model LEDI for 30,352 settlements in entire Ukraine, including 1,263 settlements in Kyiv, 1,717 – in Zhytomyr and 1,570 – in Chernihiv Oblasts. The results of model calculations of trajectories of radioactively contaminated air masses obtained in this study is different from previously calculated [1, 2], primarily due to using of more detailed data on the wind field in the lower atmosphere (Fig. 2). At the same time, the difference in results for the two sets of meteorological data was significantly different depending on the date of release and the specific region. The locations and dates of the largest differences in trajectories are in fact an indicator of the most significant adjustments in the dispersion of radioactive releases due to the use of the results of the WRF weather forecast model in the new version of the simulation. The main reason for such differences is the clarification of the characteristics of the atmosphere in some regions of Ukraine in those periods when radioactive emissions from the Chernobyl nuclear power plant were transported moved there (Table 1). As mentioned above, this refinement in the new version of the calculations was due to the higher detail of meteorological parameters in space and time compared to the data

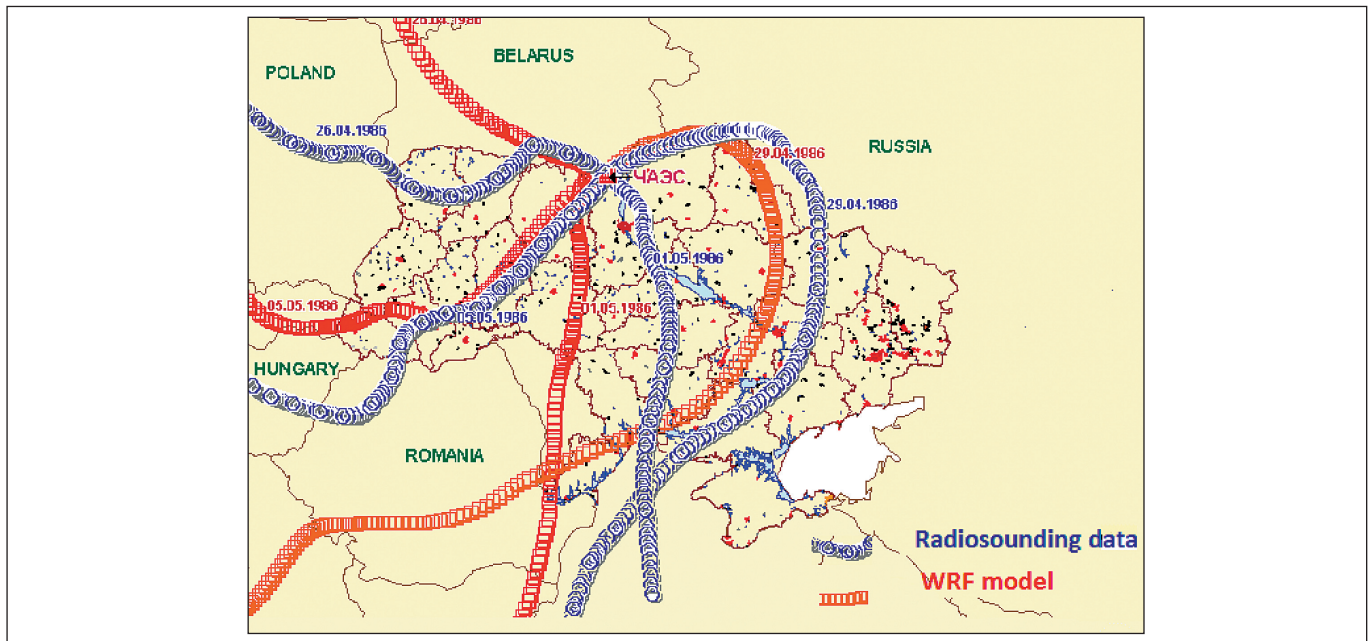


Рисунок 2. Приклади розрахункових траєкторій атмосферного перенесення радіоактивних викидів з аварійного блока ЧАЕС протягом 26.04, 29.04 та 05.05.1986 р. згідно зі старою (Radiosounding data) та новою (WRF model) версіями реконструкції

Figure 2. Trajectories of atmospheric transport of radioactive releases from the Chernobyl NPP on 26 and 29 April and 5 May 1986 according to the previous (Radiosounding data) and updated (WRF model) versions of atmospheric transport model LEDI

Таблиця 1

Середнє за область відношення щільності випадань ^{131}I у населених пунктах згідно з новою (σ_I^{new}) та старою (σ_I^{old}) версіями модельних розрахунків

Table 1

The oblast averaged ratio of ^{131}I deposition density in the settlements according to the new (σ_I^{new}) and old (σ_I^{old}) versions of model calculations

Область / Oblast	Кількість НП / Number of settlements	$\sigma_I^{\text{new}} / \sigma_I^{\text{old}}$
Вінницька / Vinnytsia	635	2.81
Волинська / Volyn	347	0.96
Луганська / Luhansk	289	4.47
Дніпропетровська / Dnipro (Dnipropetrovsk)	297	1.55
Донецька / Donetsk	339	0.90
Житомирська / Zhytomyr	1717	0.97
Закарпатська / Zakarpattia	295	0.95
Запорізька / Zaporizhzhia	262	1.06
Івано-Франківська / Ivano-Frankivsk	391	5.61
Київська / Kyiv	1263	0.97
Кіровоградська / Kropyvnytskyi (Kirovohrad)	348	0.82
Крим / Crimea	285	0.99
Львівська / Lviv	561	0.97
Миколаївська / Mykolaiv	256	2.70
Одеська / Odesa	411	4.13
Полтавська / Poltava	416	0.99
Рівненська / Rivne	328	0.99
Сумська / Sumy	381	1.04
Тернопільська / Ternopil	453	6.41
Харківська / Kharkiv	406	0.99
Херсонська / Kherson	275	1.03
Хмельницька / Khmelnytskyi	502	0.96
Черкаська / Cherkasy	463	0.87
Чернівецька / Chernivtsi	223	4.23
Чернігівська / Chernihiv	1570	0.97
Вся Україна / Entire Ukraine	12713	1.68

Чорнобильської АЕС (табл. 1). Як були сказано вище, таке уточнення в новій версії розрахунків було обумовлено вищою деталізацією метеопараметрів у просторі і часі, порівняно з даними прямих вимірювань в періоди швидкої перебудови атмосферних процесів у цей час. Водночас для значної частини території України відмінності в модельних розрахунках виявилися несуттєвими. Тобто згідно з новою версією розрахунків отримано уточнення щільності радіоактивних випадань ^{131}I для деяких регіонів України, в той же час для решти регіонів України оцінки щільності радіоактивних випадань ^{131}I майже не змінилися, порівняно з попередньою версією [2].

Табл. 1 демонструє, що найзначніша переоцінка щільності випадань ^{131}I отримана насамперед для південно-західних (Івано-Франківська, Тернопільська, Чернівецька) і південних (Миколаївська та Одеська) областей, а також Луганської області – збільшення модельних оцінок щільності випадань йоду-131 σ_I в середньому по області до 4–6 разів. Зазначимо при цьому, що абсолютні значення σ_I для цих областей за обома версіями реконструкції є відносно низькими (рис. 3). Наприклад, для більшості НП Луганської області кумулятивна (за весь період викидів) щільність випадань йоду-131 не перевищує $100 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$.

Карта кумулятивних випадань ^{131}I на території України представлена на рис. 3. Загалом для України найбільші значення кумулятивних випадань

of direct measurements during periods of rapid restructuring of atmospheric processes at this time. Alternatively, for the part of the 10-day period of intensive radioactive releases and a large part of the territory of Ukraine, the differences in the model calculations according to both versions turned out to be minor. As a result, significant difference in ^{131}I deposition densities calculated by two versions of the model was observed locally in some regions of Ukraine while for the rest of territory the updated estimates are practically the same as obtain previously [2].

Table 1 shows average for oblast ratio of ^{131}I deposition density in the settlements that were calculated using updated model to those calculated using previous version of the model. The most significant increase (with a factor more than 4) in calculated ^{131}I deposition density was found for the south-western (Ivano-Frankivsk, Ternopil and Chernivtsi), southern (Odesa) and eastern (Luhansk) Oblasts, namely the increase of model estimates of iodine-131 σ_I precipitation density on average in the region up to 4–6 times. Absolute values of ^{131}I deposition densities in these oblasts were rather low and did not exceed, for example, $100 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$ in Luhansk Oblast.

Fig. 3 shows the map of ^{131}I deposition on the territory of Ukraine. The highest ^{131}I deposition density of $115 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$ in 26 April – 7 May 1986 was

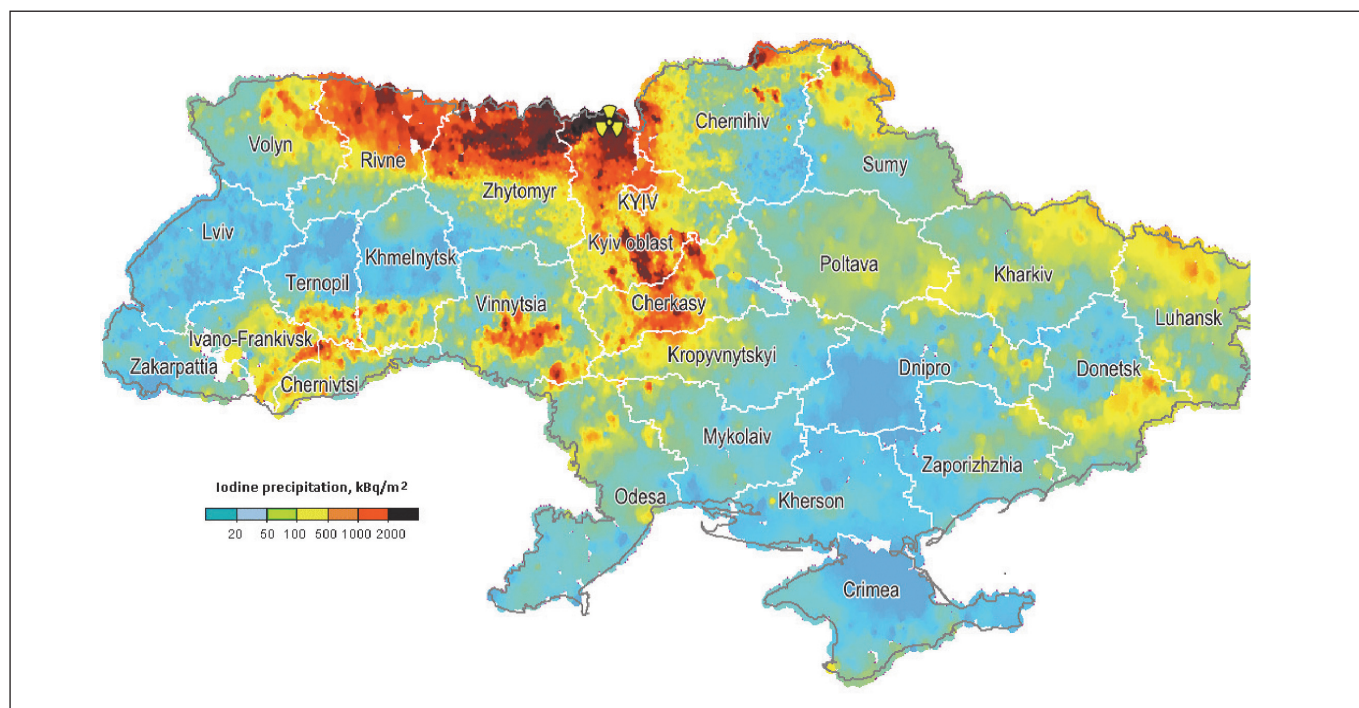


Рисунок 3. Карта щільності кумулятивних випадань радіонукліду ^{131}I на поверхню ґрунту на території України

Figure 3. Map of ^{131}I cumulative ground deposition density in Ukraine

^{131}I за період 26.04–07.05.1986 р. отримано для сіл Варовичі (40 км на захід від ЧАЕС) – $115,0 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$ і Товстий Ліс (22 км на захід від ЧАЕС) – $114,8 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$. Для м. Прип'ять відповідне значення становить $88,2 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$. Найбільше значення випадань ^{131}I за межами ЧЗВ отримано для сіл Ясень (52 км на захід від ЧАЕС) – $52,5 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$ і Мартиновичі (65 км на захід від ЧАЕС) – $48,6 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$. У Києві кумулятивні випадання ^{131}I були на рівні $449 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$, максимальна середньодобова активність ^{131}I в приземному повітрі $330 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ (01.05.86 р.), а середня активність ^{131}I в приземному повітрі за період інтенсивних випадань в Києві (з 30.04 по 05.05.86 р.) – $124 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$.

Максимальне значення щільності випадань ^{131}I в Житомирській області отримано для села Нове Шарне Народицького р-ну – $27,9 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$; в Чернігівській області – $9,6 \text{ МБк} \cdot \text{м}^{-2}$ в селі Локотків Чернігівського р-ну (обидва НП увійшли до зони обов'язкового відселення). Для міст Житомир і Чернігів модельні значення щільності випадань ^{131}I становить $53,7 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ та $261 \text{ кБк} \cdot \text{м}^{-2}$ відповідно.

Основні джерела невизначеності розрахованої щільності випадань ^{131}I на поверхню ґрунту зумовлені варіабельністю вхідної метеорологічної інформації, параметрів джерела викиду та внутрішніх параметрів моделі. Найбільш точна оцінка невизначеності отриманих результатів за методом Монте-Карло, яка враховує всі ці фактори, є достатньо складним завданням, оскільки вимагає великої кількості модельних розрахунків. Тому геометричне стандартне відхилення (GSD) випадань ^{131}I для кожної області оцінювалось з урахуванням двох факторів: 1) варіабельності відношення модельних розрахунків щільності випадань ^{131}I до фактичних даних вимірювань цих випадань; 2) варіабельності відношення радіоактивності ^{131}I до ^{137}Cs у випаданнях. У результаті GSD щільності випадань ^{131}I для різних областей України було оцінено в межах від 2.3 до 3.0 в тому числі для Житомирської області – 2.6, для Київської – 2.9, а для Чернігівської – 3.0.

Верифікація результатів моделювання щільності випадань йоду-131 на території України за даними вимірювань забруднення ґрунту в Білорусі

Однією з головних причин проведення реконструкції випадань йоду-131 на території України була практично повна відсутність масових вимірювань вмісту радіойоду в ґрунті протягом перших місяців

estimated in Varovychi village and Tovsty Lis village (40 km and 22 km respectively to the west from the Chornobyl NPP). The corresponding value for Pripjat town was $88.2 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$. The highest ^{131}I depositions outside the 30-km zone were estimated for the for Yasen village ($52.5 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$) and Martynovychi village ($48.6 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$) (52 km and 65 km respectively to the west from the Chornobyl NPP). For Kyiv, the cumulative ^{131}I depositions was obtained to be $449 \text{ kBq} \cdot \text{m}^{-2}$, the maximum daily ^{131}I activity in the surface air was $330 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$ on 1 May 1986, and the average ^{131}I activity in the surface air during the period of intensive fallout in Kyiv, from 30 April to 5 May 1986, was $124 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-3}$.

The highest ^{131}I deposition densities in other two most contaminated Zhytomyr and Chernihiv Oblasts in Ukraine were estimated, respectively, to be $27.9 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$ in village Nove Sharne of Narodychi raion and $9.6 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$ in village Lokotkiv of Chernihiv raion. For the cities of Zhytomyr and Chernihiv, the ^{131}I deposition density was $0.054 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$ and $0.26 \text{ MBq} \cdot \text{m}^{-2}$, respectively.

The main sources of uncertainties of calculated ^{131}I ground deposition density are due to variances of input meteorological information, source term parameters and internal parameters of the model. The most correct estimation of the uncertainties of the obtained results by Monte-Carlo procedure is a complicated task because it's necessary to do a large number of model runs. So the geometric standard deviation (GSD) of ^{131}I ground deposition for each oblast was calculated using two factors: 1) variability of the ratios of the calculated results of the ^{137}Cs ground deposition density to the direct measurement of this density in the settlements of the oblast; and 2) variability of the ratio of ^{131}I to ^{137}Cs radioactivity in the depositions. As the result the GSD of the ^{131}I ground deposition values for various oblasts in Ukraine was estimated in the range of 2.3–3.0 including 2.6 for Zhytomyr, 2.9 for Kyiv, and 3.0 for Chernihiv oblast.

Validation of model calculations of ^{131}I deposition density in Ukraine using the measurements of ^{131}I activity in soil samples in Belarus

The need to use the model calculations for the reconstruction of ^{131}I deposition in Ukraine was due to lack of large-scale radiation monitoring of environmental samples during the first few weeks

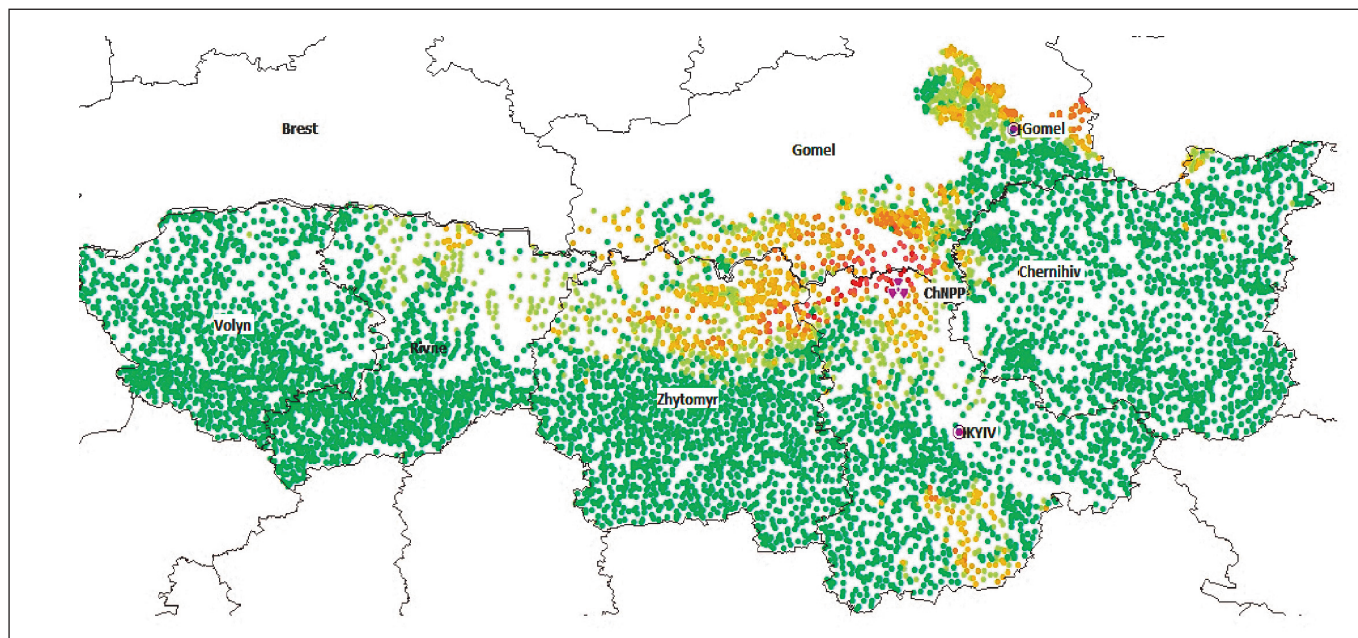


Рисунок 4. Карта забруднення земної поверхні йодом-131 (кБк/м²), що поєднує: а) результати модельних розрахунків щільності випадань для населених пунктів 5 областей України; б) дані вимірювань вмісту йоду-131 в ґрунті в населених пунктах Гомельської області Білорусі

Figure 4. Iodine-131 ground deposition density (kBq/m²) which combines: a) the results of model calculations of the density of precipitation for the settlements of 5 regions of Ukraine; b) data on measurements of iodine-131 content in the soil in the settlements of the Gomel region of Belarus

після аварії. Відповідно це унеможлиблює пряму верифікацію модельних розрахунків. На відміну від України, в Білорусі в травні-червні 1986 р. було проведено масовані вимірювання радіоактивного забруднення ґрунту, що дало змогу отримати дані про вміст йоду-131 у ґрунті [8]. Ця інформація дає можливість непрямої верифікації результатів моделювання щільності випадань йоду-131 у північних, найбільш забруднених районах України. Для верифікації результатів моделювання були використані дані вимірювань забруднення ґрунту в Білорусі, які включають 1103 значень вмісту ¹³¹I в ґрунті в 1103 населених пунктах 9 районів Гомельської області [9]. На рис. 4 наведено карту забруднення земної поверхні йодом-131, що містить значення: а) результатів модельних розрахунків щільності випадань для населених пунктів 5 областей України (Волинської, Рівненської, Житомирської, Київської та Чернігівської); б) даних вимірювань вмісту йоду-131 в ґрунті в населених пунктах Гомельської області Білорусі. Як видно з рисунка, загальна картина формування поля радіоактивних випадань, отримана для західного і північно-східного слідів на території України в цілому узгоджується з даними прямих вимірювань забруднення йодом території Білорусі.

Більш детально кількісне узгодження результатів для прикордонних районів України (моделювання) і

after the accident. Accordingly, it makes it impossible to directly verify the obtained data of model calculations. In contrast with Ukraine, measurements of radionuclides, including ¹³¹I, in soil samples were done in Belarus in May-June 1986 [8]. These data allowed validating the results of model calculations of ¹³¹I deposition density in the most contaminated northern Ukraine along the border with Belarus. Data from measurements of soil pollution in Belarus were used to verify the simulation results. Results of measurements of ¹³¹I in soil samples available for 1,103 settlements in Gomel Oblast (Belarus) [9] neighboring to Chernihiv, Kyiv and Zhytomyr Oblasts in Ukraine were used in validation exercise. Fig. 4 shows a map of ¹³¹I ground deposition density that includes the model calculations for Volyn, Rivne, Zhytomyr, Kyiv and Chernihiv Oblasts in Ukraine and measurements for Gomel Oblast in Belarus. As can be seen from the figure, the general pattern of the formation of the field of radioactive fallout, obtained for the western and northeastern traces on the territory of Ukraine is generally consistent with the data of direct measurements of iodine contamination in Belarus.

Fig. 5 shows ¹³¹I deposition density in settlements located along the border of Kyiv and

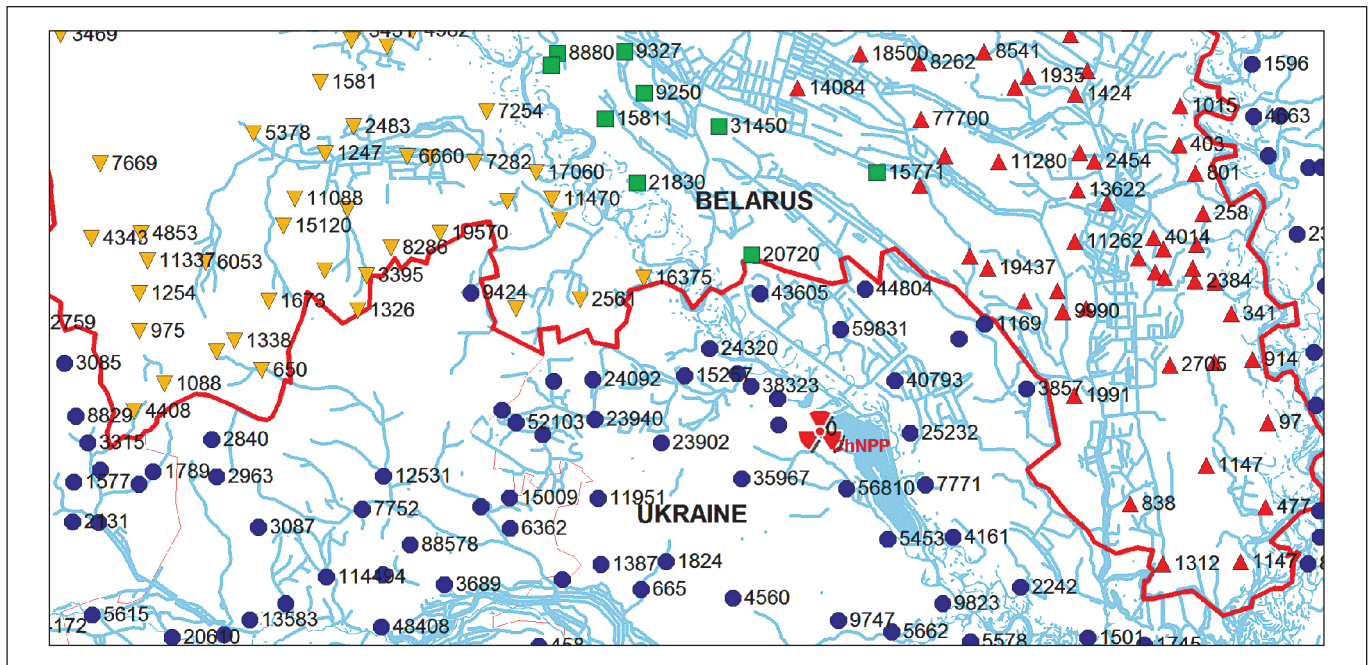


Рисунок 5. Карта забруднення земної поверхні ^{131}I (кБк/м 2)

Результати модельних розрахунків щільності випадань для населених пунктів Київської області України (●). Дані вимірювань вмісту ^{131}I в ґрунті в населених пунктах Наровлянського (▼), Хойнікського (■) і Брагінського (▲) районів Гомельської області Білорусі.

Figure 5. ^{131}I ground deposition density (kBq/m 2)

Calculated using model for the settlements in Kyiv Oblast in Ukraine (●). Measured ^{131}I in soil in the settlements of Narovlya (▼), Khoyniki (■) and Bragin (▲) raions in Gomel Oblast in Belarus.

Білорусі (вимірювання) показано на рис. 5. Як видно з нього, поле забруднення земної поверхні йодом-131 має високу варіабельність. Згідно з даними вимірювань, щільності забруднення йодом-131 в сусідніх населених пунктах Білорусі можуть відрізнятися в 2 і більше разів, що відображає складний характер формування поля радіоактивних випадань в результаті Чорнобильської аварії. Результати виконаної реконструкції поля випадань з використанням алгоритму корекції результатів моделювання за даними вимірювань ^{137}Cs для кожного населеного пункту України (так звані локальні ефективні опади) [2] також демонструють високу варіабельність результатів на локальному масштабі. Разом з тим, для територій, наведених на рис. 4 та 5, відсутній систематичний «стрибок» між областями моделювання (Україна) і прямих вимірювань (Білорусь), що підтверджує обґрунтованість модельних результатів реконструкції забруднення ^{131}I для території України.

ВИСНОВКИ

У роботі на основі методу математичного моделювання атмосферного перенесення радіонуклідів виконано розрахунок добових випадань та середньодобових об'ємних активностей ^{131}I в приземному шарі повітря за період з 26 квітня по 7 травня 1986 року для 30352 насе-

Chernihiv Oblasts in Ukraine (calculated values) and Gomel Oblast in Belarus (measured values). High variability of ^{131}I deposition densities was observed for both, modeled and measured values. Deposition density measured in two neighboring settlements in Belarus located on distance around 1 km could differ by factor of 2 or more. The results of the reconstruction of the precipitation field using the algorithm for correcting the results of modeling according to ^{137}Cs measurements for each settlement of Ukraine (so-called local effective precipitation) [2] also show high variability of results on a local scale. However, no systematic difference in values of ^{131}I deposition density between the areas of modeling (Ukraine) and measurements (Belarus) was observed (Fig. 4 and 5) that confirms the validity of the results of model calculations for the territory of Ukraine.

CONCLUSIONS

Using mathematical modeling the atmospheric transport of the radionuclides, the daily ^{131}I activity concentrations in air and the ^{131}I ground deposition densities were calculated for the period from 26 April to 7 May 1986 for 30,352 settlements in

лених пунктів всіх областей України, включаючи 1263 населених пункта в Київській, 1717 — в Житомирській та 1570 — в Чернігівській областях. Завдяки використанню сучасної мезомасштабної моделі чисельного прогнозу погоди WRF вдалося суттєво уточнити результати у порівнянні з попередніми модельними оцінками [2] у тих регіонах України, де обсяги даних прямих вимірювань метеорологічних параметрів нижнього шару атмосфери (до висот 2–3 кілометрів) були недостатніми. Уточнена та розширена за кількістю населених пунктів база модельних значень добових випадань та середньодобових значень об'ємної активності ^{131}I в приземному повітрі може бути використана в задачі реконструкції доз опромінення щитоподібної залози осіб, які проживали на території України у квітні-червні 1986 р.

Вдячність

Математичне моделювання перенесення радіонуклідів в атмосфері виконувалось за фінансової підтримки Національної академії наук України, НДР державний реєстраційний № 0110U001592. Вимірювання щільності кумулятивних випадань ^{137}Cs на території України фінансувалось Урядом України. Валідація модельних розрахунків фінансувалась дослідницькою програмою Відділення епідеміології раку та генетики Національного інституту раку США (NIH, DHHS) через партнерську угоду № P-004 між Українським науково-технологічним центром та Національним інститутом раку США. Автори висловлюють щирю подяку Маурін Хатч, Валентині Будерацькій та нині покійній Анні Кузьменко за допомогу у підготовці цієї статті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Talerko N. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident *J. Environ. Radioact.* 2005. Vol. 78. P. 311–329. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.04.008.
2. Talerko N. Reconstruction of ^{131}I radioactive contamination in Ukraine caused by the Chernobyl accident using atmospheric transport modeling. *J. Environ. Radioact.* 2005. Vol. 84. P. 343–362. doi: 10.1016/j.jenvrad.2005.04.005.
3. Основні принципи та досвід проведення комплексної дозиметричної паспортизації населених пунктів України / І. А. Ліхтарьов, Л. М. Ковган, С. В. Масюк та ін. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології*. 2015. Вип. 20. С. 75–103.
4. Powers J., Klemp J. B., Skamarock W. C., Davis C. A., Dudhia J., Gill D. O., Coen J. L., Goghis D. J., Ahmadov R., Peckham S. E., Grell G. A., Michalakes J., Trahan S., Benjamin S. G., Alexander C. R., Dimego G. J., Wang W., Schwartz C. S., Romine G. S., Liu Z., Snyder C., Chen F., Barlage M. J., Yu. W., Duda M. G. The Weather Research and Forecasting

entire Ukraine, including 1,263 settlements in Kyiv, 1,717 — in Zhytomyr and 1,570 — in Chernihiv Oblasts, the most contaminated areas in Ukraine after the Chernobyl accident. The use of up-to-date mesoscale model of numerical weather forecast WRF enabled significant improvement of the results of model calculations in comparison with previous model estimates, especially in those regions where data on meteorological parameters of the lower atmosphere (up to altitudes of 2–3 kilometers) were insufficient. The concentrations of ^{131}I activity in air and ^{131}I ground deposition densities, which were calculated in this study, were used to reconstruct the thyroid doses due to ^{131}I intake to the population of Ukraine.

Acknowledgement

Financial support for the mathematical modeling of atmospheric transport of the radionuclide was provided by the National Academy of Sciences of Ukraine, state registration #0110U001592. Measurements of the ^{137}Cs ground deposition densities over the territory of Ukraine were funded by the Government of Ukraine. The validation of model calculations was supported by the Intramural Research Program of the National Cancer Institute, Division of Cancer Epidemiology and Genetics (NIH, DHHS) through Partner Agreement P-004 between the Science and Technology Center in Ukraine and the U.S. National Cancer Institute. The authors would like to thank Dr. Maureen Hatch, Valentyna Buderatska and the late Anna Kuzmenko for their help in preparing the paper.

REFERENCES

1. Talerko N. Mesoscale modelling of radioactive contamination formation in Ukraine caused by the Chernobyl accident. *J Environ Radioact.* 2005; 78:311-329. doi: 10.1016/j.jenvrad.2004.04. 008.
2. Talerko N. Reconstruction of ^{131}I radioactive contamination in Ukraine caused by the Chernobyl accident using atmospheric transport modeling. *J Environ Radioact.* 2005;84:343-362. doi: 10.1016/j.jenvrad.2005. 04.005.
3. Likhtarev IA, Kovgan LM, Masiuk SV, Ivanova OM, Chepurny MI, Boyko ZN, Gerasymenko VB. Basic principles and practices of integrated dosimetric passportization of the settlements in Ukraine. *Probl Radiac Med Radiobiol.* 2015;20:75-103.
4. Powers J, Klemp JB, Skamarock WC, Davis CA, Dudhia J, Gill DO, Coen JL, Goghis DJ, Ahmadov R, Peckham SE, Grell GA, Michalakes J, Trahan S, Benjamin SG, Alexander CR, Dimego GJ, Wang W, Schwartz CS, Romine GS, Liu Z, Snyder C, Chen

- (WRF) model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2017. Vol. 98(8). P. 1717–1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.
5. Талерко Н. Н., Гаргер Е. К., Ключников А. А. Прогнозирование последствий аварийных выбросов из объектов атомной энергетики с помощью мезомасштабной модели атмосферного переноса LEDI. *Доповіди Національної академії наук України*. 2010. № 12. С. 74–79.
 6. Українська РСР. Адміністративно-територіальний устрій (станом на 1 січня 1987 року) / відп. ред. В. І. Кирненко, В. І. Стаднюк. Київ : Українська Радянська Енциклопедія, 1987. 504 с.
 7. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system / D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons et al. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2011. Vol. 137. P. 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
 8. Database of meteorological and radiation measurements made in Belarus during the first three months following the Chernobyl accident / V. Drozdovitch, O. Zhukova, M. Germenchuk et al. *J. Environ. Radioact.* 2013. Vol. 116. P. 84–92. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.09.010.
 9. Реконструкция выпадений ^{131}I после аварии на Чернобыльской АЭС на территории Гомельской и Могилевской областей Беларуси / О. М. Жукова, М. Г. Герменчук, М. А. Подгайская и др. *Природные ресурсы*. 2011. Вып. 2. С. 114–121.
 - F, Barlage MJ, Yu W, Duda MG. The Weather Research and Forecasting (WRF) model: Overview, system efforts, and future directions. *Bull Amer Meteor Soc.* 2017;98(8): 1717-1737. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-15-00308.1>.
 5. Talerko NN, Garger EK, Klyuchnikov AA. [Prediction of the consequences of accidental releases from nuclear power plants with the help of the mesoscale atmospheric transport model LEDI]. *Reports of National Academy of Sciences of Ukraine*. 2010;12;74-79. Russian.
 6. Kyrnenko VI, Stadnyuk VI, editors. Ukrainian SSR. Administrative and territorial structure (as at 1 January 1987). Kyiv: Ukrainska Radianska Entsiklopediia; 1987. Ukrainian.
 7. Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 2011;137:553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>.
 8. Drozdovitch V, Zhukova O, Germenchuk M, Khrutchinsky A, Kukhta T, Luckyanov N, Minenko V, Podgayskaya M, Savkin M, Vakulovsky S, Voilleque P, Bouville A. Database of meteorological and radiation measurements made in Belarus during the first three months following the Chernobyl accident. *J Environ Radioact.* 2013;116:84-92. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.09.010.
 9. Zhukova OM, Germenchuk MG, Podgayskaya MA, Golikov YN, Khrutchinsky AA, Kutsen SA, Kukhta TS, Minenko VF, Schechin YK, Drozdovitch W. [Reconstruction of ^{131}I depositions after the accident at the Chernobyl NPP on the territory of Gomel and Mogilev regions of Belarus]. *Natural Resources*. 2011;2:114-121. Russian.

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Талерко Микола Миколайович, доктор технічних наук, ст. наук. співр., завідувач відділу радіаційної екології, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ

Лев Тетяна Дмитрівна, кандидат географічних наук, ст. наук. співр., завідувачка сектору відділу радіаційної екології, Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, м. Київ

Дроздович Володимир В'ячеславович, кандидат технічних наук, наук. співр. відділу епідеміології раку та генетики, Національний інститут раку, НІЗ, Бетезда, Меріленд, США

Масюк Сергій Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, завідувач лабораторії радіологічного захисту, Інститут радіаційної гігієни і епідеміології ННЦРМ, м. Київ

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Mykola M. Talerko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department of Radiation Ecology, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Tetiana D. Lev, Ph.D., Head of Sector of Department of Radiation Ecology, Associate Professor, Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Vladimir V. Drozdovitch, Ph.D., Staff Scientist, Division of Cancer Epidemiology and Genetics, National Cancer Institute, NIH, Bethesda, MD, USA

Sergii V. Masiuk, Ph.D., Head of Radiation Protection Laboratory, Radiation Hygiene and Epidemiology Institute, NRCRM, Kyiv, Ukraine