

УДК 551.521:633.2:631.95:615.849

Г. М. Чоботько✉, Л. А. Райчук, В. П. Ландін*Інститут агроєкології і природокористування Національної академії аграрних наук України,
вул. Метрологічна, 12, м. Київ, 03143, Україна*

ОСОБЛИВОСТІ ТА ПРОГНОЗ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ СІЛЬСЬКОГО НАСЕЛЕННЯ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ У ВІДДАЛЕНИЙ ПЕРІОД ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС (МОНІТОРИНГОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ)

Мета: оцінка впливу лісової екосистеми на формування річних ефективних доз внутрішнього опромінення (^{137}Cs) населення Українського Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС та прогнозне моделювання доз внутрішнього опромінення мешканців регіону.

Матеріали і методи. Дозиметричний контроль населення (дорослі та діти шкільного віку, в середньому по 80 осіб у групі у населеному пункті) Київської обл. проводили впродовж 2003–2011 рр. з використанням спектрометра «Скрінер-3М» відповідно до «Методичних рекомендацій з дозиметричної паспортизації населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії». Гамма-спектрометричний аналіз проб проводили спектрометричним методом (ДСТУ 3743-98) на приладі СЕГ-005, детектор БДЕГ-63. Статистична обробка даних була проведена за допомогою Microsoft Excel 2016 та OriginPro 9. Комп'ютерну реалізацію моделі виконували у математичному пакеті MAPLE 10.

Результати. Річні ефективні дози внутрішнього опромінення мешканців населених пунктів Українського Полісся визначаються рівнем забруднення певних екосистем, насамперед так званих «критичних». Для досліджуваного регіону це, перш за все, лісові екосистеми та природні кормові угіддя, які здатні формувати значні дозові навантаження на населення внаслідок споживання молока і продуктів харчування лісового походження: грибів, лісових ягід, дичини тощо. Апроксимація експериментальних даних за порами року підтвердила гіпотезу стосовно експоненційного розподілу для весни та логнормального для осені. Експоненційний розподіл властивий статистичним сукупностям, чинники формування яких є незмінними або малозмінними. Тобто, навесні жоден дозоформуєчий чинник, наприклад, продукт харчування, не є визначальним.

Висновки. Ймовірність отримання населенням річних ефективних доз внутрішнього опромінення в осінній період порівняно з весняним значно зростає внаслідок вживання продукції з лісових екосистем, а саме: грибів, ягід, м'яса диких тварин тощо.

Ключові слова: лісова екосистема, ефективна доза внутрішнього опромінення, математична модель, ЧАЕС.

Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. 2018. Вип. 23. С. 216–228. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-216-228.

✉ Чоботько Григорій Михайлович, e-mail: chobotko@ukr.net

H. M. Chobotko✉, L. A. Raichuk, V. P. Landin

Institute of Agroecology and Environmental Management, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, 12 Metrologichna str., Kyiv, 03143, Ukraine

CHARACTERISTICS AND PROGNOSIS OF THE INTERNAL EXPOSURE DOSES OF THE UKRAINIAN POLISSYA RURAL POPULATION IN THE REMOTE PERIOD AFTER THE ACCIDENT AT THE CHERNOBYL NUCLEAR POWER PLANT (MONITORING STUDY)

Objective: Estimation of the forest ecosystem influence on the formation of annual effective internal exposure doses (^{137}Cs) of the Ukrainian Polissya population in the remote period after the Chernobyl accident and predictive modeling of the internal exposure doses of the region residents.

Materials and methods. Dosimetric control of the population (adults and children of school age, for 80 people in the group on average in the settlement) of the Kyiv region was conducted during 2003–2011 with the Sciner-3M spectrometer according to «Methodical recommendations for conducting measurements using whole body counters for dosimetric certification of settlements» [9]. Gamma-spectrometric analysis of the samples was conducted by the spectrometric method (DSTU 3743-98) with SEG-005, the BEDG-63 detector. Experimental data were analyzed using Microsoft Excel 2016 and OriginPro 9. Computer modeling was carried out in the mathematical software MAPLE 10.

Results. Annual effective internal exposure doses of Ukrainian Polissya inhabitants determine by the contamination level of certain ecosystems, first of all so-called critical ones. For the region under study these are primarily forest ecosystems and natural forage areas which can cause significant body burdens of the population due to the consumption of milk and forest food products like wild-breed mushrooms, forest berries, game, etc. The approximation of experimental data by seasons, obtained on the WBC-measurements results, confirmed the hypothesis of the exponential distribution for spring and the lognormal one for autumn. The exponential distribution is typical for statistical ensembles, formation factors of which are little variable or permanent. Thereby, neither of dos-forming factors, for instance, any food product, is determinative in spring.

Conclusions. The probability of receiving annual effective internal exposure doses by the population increases significantly in autumn versus spring as a result of forest food products consumption like mushrooms, berries, game meat, etc.

Key words: forest ecosystem, mathematical model, effective internal exposure dose, ChNPP.

Problems of radiation medicine and radiobiology. 2018;23:216-228. doi: 10.33145/2304-8336-2018-23-216-228.

ВСТУП

Нині, через 32 роки після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС), в структурі сумарного дозового навантаження на населення Українського Полісся переважає внутрішнє опромінення. Воно формується внаслідок споживання радіоактивно забруднених харчових продуктів, отриманих на територіях, які постраждали внаслідок аварії. У різний час та на різних територіях основними дозоутворюючими продуктами були молоко корів, картопля, овочі тощо. Для більшості населених пунктів Українського Полісся критичними в цьому розумінні були й залишаються продукти харчування лісового походження – гриби, ягоди, дичина [1, 2]. Погіршення економічної ситуації зумовило зниження рівня добробуту людей, що призвело до зростання споживання потенційно радіоактивно забруднених продуктів (регулярне зби-

INTRODUCTION

Today, 32 years after the accident on Chernobyl nuclear power plant (ChNPP), internal irradiation is prevalent in the structure of the total radiation exposure on the population of Ukrainian Polissya. It is formed as a result of the consumption of radioactive contaminated food products obtained in areas affected by the accident. At different times and in different territories the main dose-forming products were cow milk, potatoes, vegetables, etc. For most settlements of Ukrainian Polissya forest food products, such as mushrooms, berries and game were and remain critical in this sense [1, 2]. The deterioration in the economic situation caused the people's welfare decline. It led to an increase in the consumption of potentially radioactively contaminated products (hunting,

рання грибів, ягід, полювання) [3]. Саме ці продукти харчування накопичують ^{137}Cs , якому належить майже 3/4 у структурі дозового навантаження на населення внаслідок аварії на ЧАЕС [4, 5]. Їх внесок у дозу внутрішнього опромінення коливається від 12 до 40 % у всього населення Полісся і до 50–95% – у його критичних груп [6–8]. Все вищезазначене й визначило мету нашого дослідження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – оцінка впливу лісової екосистеми на формування річних ефективних доз внутрішнього опромінення (^{137}Cs) населення Українського Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС та прогнозне моделювання доз внутрішнього опромінення мешканців регіону.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Аналіз радіоекологічної ситуації в досліджуваному регіоні здійснювали на основі даних, отриманих під час експедицій, проведених співробітниками Інституту агроєкології і природокористування Національної академії аграрних наук України, та спостережень місцевих радіологічних і радіоекологічних служб. Було зібрано, проаналізовано та узагальнено такі дані: забруднення ^{137}Cs лісових масивів (за даними Міністерства АПК України); радіонуклідне забруднення сільгосппродукції; раціон харчування населення (анкетування експертів); річна ефективна доза внутрішнього опромінення мешканців Українського Полісся.

Моніторинг сезонного розподілу дозових навантажень серед дорослого населення та дітей шкільного віку (в середньому по 80 осіб у групі у населеному пункті) Київської обл. проводили впродовж 2003–2011 рр. з використанням спектрометра «Скрінер-3М» (лічильник випромінювання людини, ЛВЛ) відповідно до «Методичних рекомендацій з дозиметричної паспортизації населених пунктів України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської аварії» [9].

Дослідження радіоактивного забруднення лісів було проведено у Зеленополянському лісництві ДП «Поліське лісове господарство» Київської області. Використовували стандартні методики та інструкції, прийняті для відбору зразків, їх підготовки та проведення лабораторних аналізів [10–12].

Гамма-спектрометричний аналіз проб проводили спектрометричним методом (ДСТУ 3743-98) на приладі СЕГ-005, детектор БДЕГ-63. Похибка вимірювання вмісту ^{137}Cs у зразках не перевищувала 15 %. Вимірювальні прилади мали Свідоцтво про повірку

regular picking up mushrooms and berries) [3]. These particular food products accumulate ^{137}Cs , which takes almost 3/4 in the dose structure of the population caused by the ChNPP accident [4, 5]. Their contribution to the internal exposure dose ranges from 12 to 40 % for the total Polissya population to 50–95 % for its critical groups [6–8]. All the above determined the goal of our research.

OBJECTIVE

Estimation of the forest ecosystem influence on the formation of annual effective internal exposure doses (^{137}Cs) of the Ukrainian Polissya population in the remote period after the Chernobyl accident and predictive modeling of the internal exposure doses of the region residents.

MATERIALS AND METHODS

The analysis of the radioecological situation in the region under investigation were carried out on the basis of data obtained by expeditions conducted by the Institute of Agroecology and Environmental Management, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine and observations of local radiological and radioecology offices. The following data was collected, analyzed and summarized: ^{137}Cs contamination of forest (according to the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine); ^{137}Cs contamination of agricultural products; diet of the local population (questionnaire of experts); annual effective internal exposure dose of Ukrainian Polissya residents.

Monitoring of seasonal distribution of internal exposure dose of the adults and school-age children (for 80 people in the group on average in the settlement) of the Kyiv region was conducted during 2003–2011 with the gamma spectrometer Scriner-3M (whole-body counter, WBC) according to «Methodical recommendations for conducting measurements using whole body counters for dosimetric certification of settlements» [9].

Researching of radioactive contamination of forests was carried out in Zelenopolyanske forestry of the State Enterprise «Poliske Forestry» of the Kyiv region. Standard techniques and instructions adopted for sampling, preparation and laboratory analysis were used [10–12].

Gamma-spectrometric analysis of the samples was conducted by the spectrometric method (DSTU 3743-98) with SEG-005, the BEDG-63 detector. The ^{137}Cs measurement error did not exceed 15 %. Measuring devices had a Certificate

робочого засобу вимірювальної техніки, видану ДП «Укрметртестстандарт».

Анкетування експертів [13] передбачало отримання даних про особливості раціону харчування населення восени та навесні, об'єми заготівлі та споживання харчових продуктів лісового походження, інформованість населення про радіоактивне забруднення і ставлення до нього.

Статистична обробка даних була проведена за допомогою Microsoft Excel 2016 та OriginPro 9. Гіпотези про вид розподілу дозових навантажень на населення перевіряли за критерієм узгодженості Пірсона. Комп'ютерну реалізацію моделі виконували у математичному пакеті MAPLE 10. Рівень збіжності прогнозів, отриманих за допомогою нашої моделі, з прогнозами вже існуючих схожих моделей оцінювали за значенням основної похибки.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Як було вказано вище, річні ефективні дози внутрішнього опромінення мешканців населених пунктів Українського Полісся визначаються рівнем радіонуклідного забруднення насамперед так званих «критичних» екосистем [13]. Для досліджуваного регіону це, перш за все, лісові екосистеми та природні кормові угіддя, які здатні формувати значні дозові навантаження на населення внаслідок споживання молока та продуктів харчування лісового походження: грибів, лісових ягід, дичини тощо. Окрім того, ці урочища мають складну гідрологію, яка істотно впливає на фізико-хімічні властивості ґрунтів. Саме тому доза внутрішнього опромінення мешканців регіону традиційно більша восени, ніж навесні (рис. 1), що підтверджують дані дослідників [14–17].

Апроксимація експериментальних даних за порами року (рис. 1) підтвердила гіпотезу стосовно експоненційного розподілу для весни та логнормального для осені. Експоненційний розподіл властивий статистичним сукупностям, чинники формування яких є незмінними або малозмінними. Тобто, навесні жоден дозоформуєчий чинник, наприклад, продукт харчування, не є визначальним. Дослідження [18–20] показують, що в деяких населених пунктах простежується саме такий вид розподілу. Тобто незмінними або малозмінними тут є такі основні дозоформуєчі чинники: рівень забруднення продуктів харчування ^{137}Cs , особливості раціону харчування населення, соціально-економічні умови тощо. Є підстави очікувати, що експоненційний закон розподілу індивідуальної дози внутрішнього опромінення місцевого на-

of verification issued by State Enterprise «Ukrmetrteststandart».

The questionnaire of experts [13] provided the data on: characteristics of the population diet in fall and spring; harvesting volumes and consumption of forest food products; awareness of the population about radioactive contamination and its attitude towards it.

Experimental data were analyzed using Microsoft Excel 2016 and OriginPro 9. Hypotheses on the distribution type of the internal exposure dose of the population were tested by Pearson criteria. Computer modeling was carried out in the mathematical software MAPLE 10. The agreement level of our model forecasts and similar current ones was estimated by the pure error value.

RESULTS AND DISCUSSION

As mentioned above, annual effective internal exposure doses of Ukrainian Polissya inhabitants are determined by the level of radionuclide contamination of certain ecosystems, especially the so-called critical ones [13]. For the region under investigation, it is primarily forest ecosystems and natural forage areas which can cause significant internal exposure doses of the population due to the consumption of milk and forest food products: mushrooms, forest berries, game, etc. Moreover, these lands have complex hydrology that significantly affects the physical and chemical properties of soils. That is why the internal exposure dose of the region inhabitants, calculated on the WBC-measurements results, is traditionally higher in autumn rather than spring (Fig. 1), which is confirmed by the data of other researchers [14–17].

Approximation of experimental data by the seasons (Fig. 1) confirmed the hypothesis of the exponential distribution for spring and the lognormal one for autumn. The exponential distribution is typical for statistical ensembles, formation factors of which are little variable or permanent. Thereby, neither of dos-forming factors, for instance, any food product, is determinative in spring. Studies [18–20] observed precisely the same distribution type for some settlements. In another words, such basic dosage-forming factors as the level of ^{137}Cs contamination of food, characteristics of the population diet, socio-economic conditions, etc., are permanent or little variable. There are some reasons to expect that the exponential distribution law of the individual internal exposure dose of the local

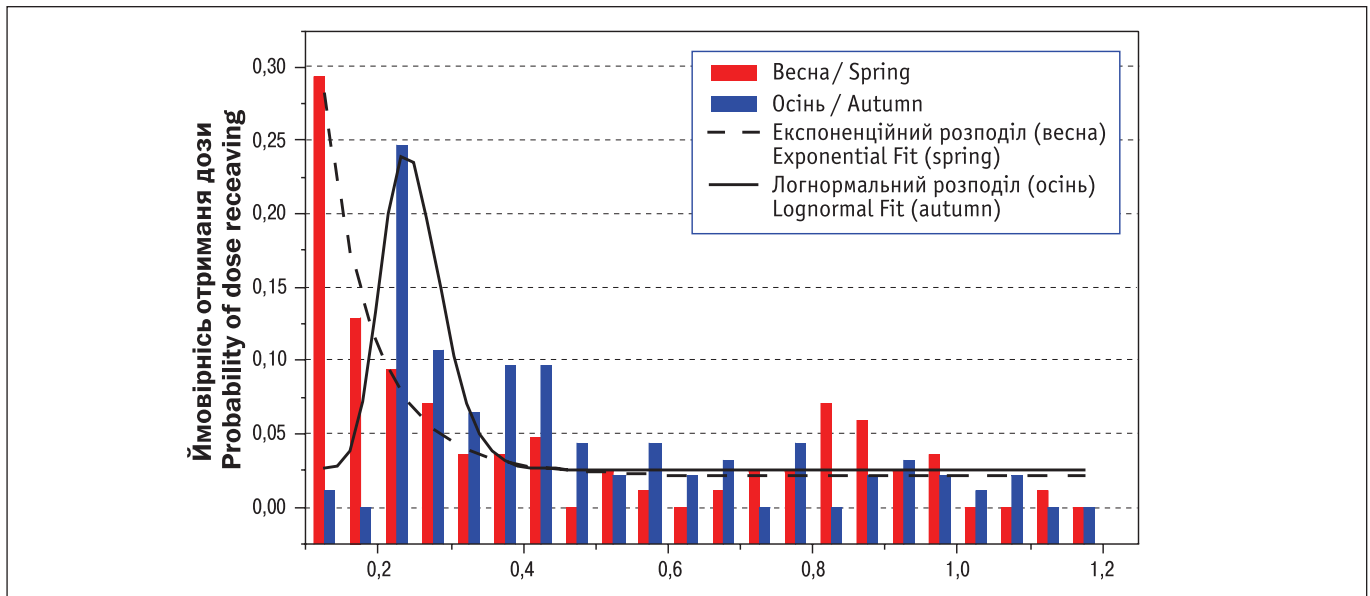


Рисунок 1. Розподіл річних ефективних доз внутрішнього опромінення, отриманих населенням Українського Полісся (на прикладі с. Рагівка Київської обл., в середньому по 80 осіб у рік) в різні пори року (весна, осінь), 2003–2011 рр.

Figure 1. Distribution of annual effective internal exposure doses of the Ukrainian Polissya population, calculated on the WBC-measurements results (on the example of Rahivka vill., Kyiv reg., about 80 people a year) in different seasons (spring, autumn), 2003–2011

селення у віддалений період після аварії на ЧАЕС буде характерним для багатьох населених пунктів регіону. Щодо осіннього періоду, то ця статистична сукупність формується внаслідок дії певної кількості чинників, деякі з яких можуть переважати (наприклад, споживання харчових продуктів лісового походження). Таким чином, обидва сезони характеризуються низкою специфічних чинників, які тим чи іншим чином визначають особливості формування дози внутрішнього опромінення населення і повинні бути враховані при прогнозованому моделюванні.

Дослідженнями встановлено, що «дари» лісу характеризуються значною питомою активністю ^{137}Cs з широким розподілом за абсолютними значеннями (табл. 1). Це є однією з причин широкого спектру значень дозових навантажень на населення.

Як видно з табл. 1, міжвидові відмінності накопичення ^{137}Cs грибами та ягодами доволі значні, а крайні значення відрізняються майже у дев'ять разів. Інтенсивність адсорбції ^{137}Cs грибами залежить від видових особливостей, особливо глибини розміщення міцелію, а також типу лісорослинних умов [21]. У різний період після аварії на ЧАЕС варіаційний ряд рівнів забруднення ^{137}Cs грибів змінюється з міграцією радіонукліду вглиб ґрунту. Відмінності між досліджуваними видами лісових ягід за здатністю до акумуляції ^{137}Cs значною мірою пояснюються особливостями їх місцезрос-

population many years after the Chernobyl accident will be inherent for many settlements of the region. As for autumn, this statistical ensemble is formed as a result of a certain number of factors, some of which may prevail (for example, consumption of forest food products). Thus, both seasons are characterized by a number of specific factors that determine the peculiarities of the formation of the internal exposure dose of the population which in one or another way and should be taken into account in predictive modeling.

The research has established that the forest «gifts» are characterized by a significant ^{137}Cs specific activity with a wide distribution of absolute values (Table 1). This is one of the reasons of a wide range of values of the internal exposure dose of the population.

As can be seen from the Table 1, the interspecies differences of the ^{137}Cs accumulation in mushrooms and berries are quite significant, and the extreme values have almost nine times difference. The intensity of ^{137}Cs adsorption by fungi depends on the species characteristics, especially the mycelium depth, and also the forest site type [21]. In different times after the ChNPP accident, the ordered sample of ^{137}Cs contamination levels of fungi changes with the radionuclide migration depthward the soil. Differences in the ^{137}Cs accumulation ability between the considered species of forest berries could be

Таблиця 1

Інтенсивність акумуляції ¹³⁷Cs продуктами харчування лісового походження, ($\bar{X} \pm S_x$)

Table 1

Intensity of ¹³⁷Cs accumulation by forest food products, ($\bar{X} \pm S_x$)

Видова назва Species name	scs^I, кБк/м² scs^I, kBq/m²	В_i^{II}, Бк/кг В_i^{II}, Bq/kg	КП^{III} TF^{III}
Дичина / game meat			
Кабан дикий / European wild hog (<i>Sus scrofa</i>)	–	480,0±126,7	–
Сарна / roe deer (<i>Capreolus Gray</i>)	–	556,0±146,8	–
Лісові ягоди / wild forest berries			
Чорниця / bilberry (<i>Vaccinium myrtillus L.</i>)	115,9±33,6	971,4±419,0	8,4±4,0
Журавлина / Cranberry (<i>Vaccinium oxycoccos</i>)	144,9±37,7	384,0±101,4	2,5±0,9
Буяхи / blueberry (<i>Vaccinium uliginosum L.</i>)	102,7±26,7	248,8±65,7	1,8±0,7
Суниця / wild strawberry (<i>Fragaria vesca</i>)	214,8±55,8	632,5±166,9	2,4±0,9
Бузина / elderberry (<i>Sambucus nigra L.</i>)	135,1±35,7	436,3±118,24	2,9±0,4
Макроміцети / macromycetes			
Сироїжки / russula (<i>Russula Pers.</i>)	266,7±64,0	5496,0±1250,0	23,3±0,2
Говорушка запашна / clitocybe (<i>Clitocybe odora</i>)	361,1±20,5	1464,0±375,0	4,3±2,6
Рядовка фіолетова / wood blewit (<i>Lepista nuda</i>)	213,8±45,5	2392,0±575,0	11,2±6,5
Маслюк пізній / butter mushroom (<i>Suillus luteus</i>)	229,7±46,3	8296,0±3565,0	34,1±16,2
Польський гриб / bay bolete (<i>Boletus badius</i>)	223,0±33,5	5400,0±750,0	37,5±7,9
Свинуха тонка / brown roll-rim (<i>Paxillus involutus</i>)	178,4±36,5	6304,0±3000,0	38,4±10,1
Білий гриб / king bolete (<i>Boletus edulis</i>)	223,5±23,3	3440,0±650,0	16,8±8,3
Підберезник звичайний / brown birch bolete (<i>Boletus scaber</i>)	253,8±21,0	1624,0±375,0	8,1±5,8
Хрящ-молочник гірчак / red-hot milkcap (<i>Lactarius rufus</i>)	159,8±23,8	3600,0±500,0	23,6±9,4
Опеньок осінній / honey agaric (<i>Armillaria mellea</i>)	228,9±24,5	1320,0±225,0	5,5±21,6

Примітка. ^Iscs – щільність забруднення ґрунту ¹³⁷Cs, ^{II}В_i – питома активність ¹³⁷Cs, ^{III}КП – коефіцієнт переходу ¹³⁷Cs.
 Note. ^Iscs – ¹³⁷Cs contamination density of soil, ^{II}В_i – specific ¹³⁷Cs activity, ^{III}TF – transfer factor for ¹³⁷Cs.

тання, а також погодними умовами. Для місцевих мешканців збирання лісових грибів та ягід для власного споживання, а інколи й продажу є традиційним.

Дози опромінення мешканців Українського Полісся загалом відомі і з роками поступово зменшуються [20]. Однак погіршення економічної ситуації призвело до зростання споживання місцевими жителями продуктів лісового походження [3, 22], а погодно-кліматичні умови окремих років можуть спричинити збільшення коефіцієнтів переходу радіонуклідів у цю продукцію з ґрунту. Тому необхідність індивідуального контролю доз внутрішнього опромінення населення, особливо його критичних груп, не втратила своєї актуальності. Незважаючи на це, останнім часом питанню радіонуклідного опромінення осіб внаслідок експлуатації лісових екосистем приділяється менше уваги, оскільки регулювати процес споживання лісових грибів та ягід, випас худоби на лісових пасовищах практично неможливо. Системні дослідження впливу невизначеностей на акумуляцію ¹³⁷Cs в організмах людей у віддалений період після аварії не проводяться. Окрім того, результати досліджень показали, що рівень обізнаності місцевого населення з сучасною

explained mainly by their growth location as well as weather conditions. Collection of forest mushrooms and berries for own consumption and sometimes for sale is traditional for local population.

The exposure doses of the Ukrainian Polissya residents are generally known and gradually diminishing with time [20]. However, the deterioration of the economic situation has led to an increase in the consumption of forest products by locals [3, 22], and the weather and climatic conditions of some years can lead to an increase in the radionuclide transfer factor in this product from the soil. Therefore, the need for individual control of internal exposure doses of the population, especially its critical groups, is still relevant. In spite of this, the issue of radionuclide irradiation of individuals due to the exploitation of forest ecosystems has been neglected lately since it is practically impossible to regulate the consumption of forest mushrooms and berries, as well as cattle grazing on forest pastures. Systemic studies of the uncertainties effect on the ¹³⁷Cs accumulation in human in the remote period after the accident are not conducted. Moreover, the studies have shown extremely low awareness of the local population with the current

радіоекологічною ситуацією та дотримання рекомендацій радіаційної гігієни доволі низький. Тому необхідність визначення особливостей впливу лісових екосистем на формування ефективної дози внутрішнього опромінення осіб у віддалений період після аварії на ЧАЕС є очевидною. Це завдання доцільно вирішувати методом математичного моделювання, оскільки лісові екосистеми є найскладнішими серед усіх наземних екосистем, а їх радіоактивне забруднення мозаїчне і багатокомпонентне.

Враховуючи вже існуючий досвід побудови компартментних моделей [23–29], математична формалізація розробленої нами моделі міграції ^{137}Cs у лісовій екосистемі має вигляд системи лінійних диференціальних рівнянь першого порядку зі сталими коефіцієнтами:

$$\frac{dQ_i}{dt} = \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N (a_{ji} Q_j + a_{ij} Q_i) + F_i(t) - \lambda Q_i \quad (1)$$

де Q_i, Q_j – рівень забруднення ^{137}Cs у певного компартменту екосистеми ($\text{Bк}/\text{м}^2$);

F_i – зовнішнє надходження ^{137}Cs до певного компартменту ($\text{Bк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{т}^{-1}$);

a_{ij} – швидкість міжкомпартментного переходу (т^{-1});

i – номер компартменту, до якого направлено потік ^{137}Cs ;

j – номер компартменту, з якого цей потік виходить;

λ – швидкість напіврозпаду ^{137}Cs .

Комп'ютерну реалізацію моделі було здійснено в математичному пакеті MAPLE 10, який у своїй символічній частині складає основу популярного пакету MatLab. Моделювання дає змогу оцінити ступінь потенційної радіологічної небезпеки певної лісової екосистеми для населення шляхом прогнозування рівнів радіоактивного забруднення її компонентів та їх питомого внеску у загальне радіаційне навантаження на населення. Наші прогнози забруднення різних компонентів лісової екосистеми співпадають з результатами, отриманими іншими дослідниками [23–29]. Рівень збігу прогнозів (таблиця 2), отриманих за допомогою нашої моделі, з прогнозами вже існуючих схожих моделей оцінювали за значенням основної похибки за загальновідомим виразом:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_1 - y'_1)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

де y – основна похибка, $\text{Bк}/\text{м}^2$;

y_1 – значення радіоактивного забруднення компартменту, отримане шляхом використання нашої моделі, $\text{Bк}/\text{м}^2$;

radioecological situation and adherence to radiation hygiene recommendations. Therefore, the necessity to determine the characteristics of the forest ecosystems influence on the formation of effective internal exposure dose of people in the remote period after the ChNPP accident is quite obvious. This problem should be solved by the mathematical modeling, since forest ecosystems are the most complex among all terrestrial ecosystems, and their radioactive contamination is mosaic and multicomponent.

Taking into account current experience of compartment models developing [23–29], the developed model of ^{137}Cs migration in the forest ecosystem is mathematically formalized as a first order partial differential system with constant coefficients:

where Q_i, Q_j are ^{137}Cs contamination levels in certain compartments (Bq/m^2);

F_i is an external source of ^{137}Cs for certain compartment ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{t}^{-1}$);

a_{ij} is an intercompartmental migration velocity (t^{-1});

i is a number of the ^{137}Cs flow-towards-directed compartment;

j – is a number of the ^{137}Cs flow-of-directed compartment;

λ – ^{137}Cs half-life period.

Computer modeling was carried out in the mathematical software MAPLE 10, which is the basis of the popular MatLab package in its symbol part. Simulation allows us to estimate the degree of potential radiological danger from certain forest ecosystem for the population by predicting the levels of radioactive contamination of its components and their contribution to the total population burden. Our prognosis of contamination of various forest ecosystems components agree closely with the other researchers results [23–29]. The agreement level of obtained predictions (Table 2) between our and similar current ones was estimated by the value of the main error calculated from the well-known expression:

where y is a main error, Bq/m^2 ;

y_1 is a value of radioactive contamination of the compartment, obtained with our model, Bq/m^2 ;

Таблиця 2
Порівняння результатів моделювання з уже існуючими моделями

Table 2
Comparison of modeling results with current models

Компартменти розробленої моделі Compartments of the developed model	Моделі, автори Models, authors	y' , Бк/м ² y' , Bq/m ²	R ⁿ , %
«Глибокі шари ґрунту» «Deep soil layers»	RIFE2 (Г. Шоу, Королівський коледж, Великобританія) RIFE2 (G. Shaw, Imperial College, UK)	9,24	60
«Дерево» «Tree»	RIFE2 (Г. Шоу, Королівський коледж, Великобританія) RIFE2 (G. Shaw, Imperial College, UK)	2,04	72
«Лабільна форма ¹³⁷ Cs в ґрунті» «Labile ¹³⁷ Cs in soil»	FORESTLAND (Р. Авіла, Державна адміністрація радіаційного захисту, Швеція) FORESTLAND (R. Avila, Swedish Radiation Protection Institute, Sweden)	1,27	81
«Підстилка» «Forest litter»	FORESTPATH (І. Лінков, Гарвардський університет) FORESTPATH (I. Linkov, Harvard University, USA)	0,10	74
«Живий надґрунтовий покрив» «Living layer»	Seymour (Е. Сеймур, П. Мітчелл, Університетський коледж Дубліна, Ірландія) Seymour (E. Seymour, P. Mitchell, University College Dublin, Ireland)	1,30	82
«Фіксована форма ¹³⁷ Cs в ґрунті» «Fixed ¹³⁷ Cs in soil»	RIFE2 (Г. Шоу, Королівський коледж, Великобританія) RIFE2 (G. Shaw, Imperial College, UK)	0,02	85

Примітка. ¹y – основна похибка; ²R – збіг результатів моделювання.
Note. ¹y – pure error, ²R – agreement of modeling results.

y'_i – значення радіоактивного забруднення компартмента, спрогнозоване за допомогою вже існуючої моделі, Бк/м²;

n – число пар порівнюваних значень.

Підсумовуючи результати прогнозного моделювання забруднення ¹³⁷Cs лісових екосистем і міграції радіонукліда їх ланками, слід наголосити, що зниження ¹³⁷Cs в лісовій екосистемі прямо залежить майже виключно від фізичного розпаду радіонукліда.

Швидкість надходження ¹³⁷Cs до організму людини з раціоном харчування визначали за формулою [30]:

$$F_i = \sum_i \sum_k A_{ik} B_{ik} \quad (3)$$

де A_{ik} – споживання людиною i -го компонента раціону харчування за одиницю часу i (кг/добу);

B_{ik} – питома забруднення ¹³⁷Cs i -го компонента раціону, що надходить із k -ї екосистеми (Бк/кг).

Якщо припустити, що в початковий момент часу $t = 0$ вміст забруднення в організмі людини становив Q_{i0} (функція утримання), то:

$$F_i(t) = F_{i0} e^{-\frac{t}{T_{ef}}} + F_i T_i (1 - e^{-\frac{t}{T_{ef}}}) \quad (4)$$

де $T_{ef} = T_{1/2} T_b / (T_{1/2} + T_b)$ – час ефективного виведення ¹³⁷Cs з організму;

T_i – час зменшення кількості забруднення в організмі;

$T_{1/2}$ – період напіврозпаду ¹³⁷Cs;

T_b – час біологічного напіввиведення ¹³⁷Cs.

y'_i is a value of radioactive contamination of the compartment, predicted with current model, Bq/m²;

n is the number of pairs of comparable values.

Summarizing the results of predictive modeling of forest ecosystems ¹³⁷Cs contamination and radionuclide migration by their compartments, it should be emphasized that the ¹³⁷Cs decrease in the forest ecosystem depends nearly exclusively on physical decay of the radionuclide.

The velocity of ¹³⁷Cs reception by the human body with a diet was determined by the expression [30]:

where A_{ik} – consumption by a person of the i -th component of the diet per i -th unit of time (kg/day);

B_{ik} – specific ¹³⁷Cs contamination of the i -th component of the diet originated by k -th ecosystem (Bq/kg).

Assuming that at the initial time $t = 0$ the body burden was Q_{i0} (the confinement function), then:

where $T_{ef} = T_{1/2} T_b / (T_{1/2} + T_b)$ is a time of ¹³⁷Cs effective elimination from a body;

T_i – time of decreasing of the ¹³⁷Cs body contamination;

$T_{1/2}$ – half-life period for ¹³⁷Cs;

T_b – biological half-time for ¹³⁷Cs.

У випадку хронічного надходження ^{137}Cs до організму, що справедливо для мешканців Українського Полісся (якщо припустити, що його виведення відбувається за експоненціальним законом), його накопичення (q) описується формулою:

$$q = \frac{1}{\ln 2} F_i T_{ef} [1 - \exp(-\frac{0,693}{T_{ef}} t)] \quad (5)$$

де F_i – швидкість надходження ^{137}Cs до організму з раціоном (визначають як суму усіх компонентів раціону харчування);

T_{ef} – час ефективного виведення ^{137}Cs з організму.

Під час кожного наступного радіоактивного розпаду організм поглинає енергію E_{ef} , яка виділяється внаслідок розпаду. Звідси величина еквівалентної дози H у цьому організмі за час t визначається виразом:

$$H = \frac{1,6 \cdot 10^{-13}}{m} E_{ef} \int_0^t q dt \quad (6)$$

де m – маса організму;

$1,6 \cdot 10^{-13}$ (Дж/МеВ) – коефіцієнт переведення МеВ у Дж;
 E_{ef} – сумарна енергія, що виділяється при β -розпаді одного ядра (1,176 МеВ для ^{137}Cs).

Встановлений нами раціон харчування включає визначальні компоненти надходження радіонуклідів до організму людини [31]. Найбільшу частку в раціоні харчування обстежених мешканців займають овочі (до 46 % навесні та 59 % восени) і молоко (до 23 % навесні та 13 % восени). Досліджений раціон харчування дав змогу визначити внесок кожного продукту раціону до дози внутрішнього опромінення. Результати обчислень показали, що, незважаючи на відносно невисоку частку харчових продуктів лісового походження у раціоні мешканців Українського Полісся, їх внесок у дозу внутрішнього опромінення може сягати від 48 % навесні до 70 % восени. Отже, у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС внаслідок інтенсивнішого переходу радіонуклідного забруднення із ґрунту в продукцію лісу порівняно з сільськогосподарською продукцією, а також тривалого утримання радіонуклідів лісовими екосистемами, мешканці сільських населених пунктів, розташованих неподалік від лісів, належать до групи ризику. Це підтверджується частішим фіксуванням у них високих доз опромінення. У північних районах Українського Полісся спостерігається значне споживання мешканцями грибів, ягід та дичини, що спричиняє зростання значень річної ефективної дози внутрішнього опромінення.

In a case of chronic irradiation due to chronic ^{137}Cs incorporation (assuming that its output is exponential), which is true for inhabitants of Ukrainian Polissya, its accumulation (q) can be described by the equation:

where F_i – velocity of ^{137}Cs uptake by a human body from a diet (defined as a sum of all the diet components);

T_{ef} – half-time for ^{137}Cs in human body.

During each following radioactive decay, the body absorbs the energy E_{ef} released as a result of decay. Hence, an equivalent dose H in this body for time t can be determined by equation:

where m – body mass;

$1,6 \cdot 10^{-13}$ (J/MeV) – MeV to J conversion factor;
 E_{ef} – the total energy emitted due to β -decay of a one nucleus (1.176 MeV for the ^{137}Cs).

The diet established by us includes the main components of the radionuclides intake by the human body [31]. The largest fraction of the surveyed inhabitants diet belongs to vegetables (up to 46 % in spring and 59 % in autumn) and milk (up to 23 % in spring and 13 % in autumn). The studied diet allowed us to determine the contribution of each product of the diet to the internal exposure dose. The results of the calculations showed that the contribution of forest food products to the internal exposure dose can range from 48 % in spring to 70 % in autumn despite their relatively low proportion in the diet of Ukrainian Polissya population. Thus, residents of rural settlements located near the forest are at risk as a result of the intensive radionuclide transition from soil to forest products versus agricultural products, as well as the long-term radionuclide maintenance by forest ecosystems in the remote period after the ChNPP accident. This is confirmed by the more frequent detecting of high exposure doses there. The high wild-breed mushrooms, berries and game meat consumption is observed in the northern regions of Ukrainian Polissya, which causes an annual effective internal exposure dose increase.

ВИСНОВКИ

Встановлено, що харчові продукти лісового походження є важливим джерелом отримання додаткової дози внутрішнього опромінення для населення Українського Полісся. У зв'язку з цим імовірність отримання вищих значень ефективних доз внутрішнього опромінення значно більша восени, аніж навесні. Однак не лише споживання продуктів лісового походження впливає на формування дози, що показує апроксимація дозових навантажень на населення логнормальним розподілом. Тому встановлення більшої кількості чинників формування дози та особливостей їх впливу потребують подальшого поглибленого дослідження.

Виявлено, що у весняний період формування дози внутрішнього опромінення є більш стійким, без переважання жодного з дозоформуючих чинників, що підтвердилося апроксимацією дозових навантажень на населення експоненціальним розподілом.

Розрахунки та прогнози, отримані за допомогою математичного моделювання міграції ^{137}Cs лісовими екосистемами, дали змогу оцінити внесок лісових екосистем у дозу внутрішнього опромінення населення Українського Полісся, який може сягати від 48 % навесні до 70 % восени, незважаючи на відносно невисоку частку харчових продуктів лісового походження у раціоні місцевих мешканців. Оскільки, як показали результати моделювання, зниження ^{137}Cs в лісовій екосистемі прямо залежить майже виключно від фізичного розпаду радіонукліда, мешканці сільських населених пунктів, розташованих неподалік від лісів, належать до групи ризику. Розроблену математичну модель можна використовувати при формуванні споживчого кошика населення радіоактивно забруднених регіонів.

Висловлювання вдячності

Ми висловлюємо вдячність Міністерству АПК України за надання даних стосовно забруднення лісових масивів та лісової продукції, а також доктору фіз.-мат. наук Ясковцю І. І. за консультації при розробленні моделі, керівнику сектору Солянику Є. І., провідному фахівцю Уманському М. С., який проводив гамма-спектрометричні вимірювання

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Analysis of the contribution of forest pathways to the radiation exposure of different population groups in the Bryansk region of Russia / S. V. Fesenko, G. Voigt, S. I. Spiridonov, N. I. Sanzharova, I. A. Gontarenko, M. Belli, U. Sansone. *Radiat. Environ. Biophys.* 2000. Vol. 39. P. 291–300.
2. The ^{137}Cs accumulation by forest-derived products in the Gomel region / N. I. Bulko, M. A. Shabaleva, A. K. Kozlov, N. V. Tolkacheva, I. A. Mashkov.

CONCLUSIONS

It was found that forest food products are an important source of obtaining an additional internal exposure dose for the Ukrainian Polissya population. In this context, the probability to obtain higher effective internal exposure doses is much higher in autumn than in spring. However, the dose forms not only due to consumption of forest products, which is confirmed by the lognormal approximation of population exposure doses. Therefore, the detection of a greater number of dose-forming factors and the peculiarities of their effects need to be further in-depth researched.

It was revealed that the formation of internal exposure dose is more stable in spring, without any dose-forming factors predominance, which was confirmed by the exponential distribution of population exposure doses.

Calculations and forecasts of mathematical modeling of ^{137}Cs migration in forest ecosystems enabled us to estimate the contribution of forest ecosystems to the internal exposure dose of the Ukrainian Polissya population, which can range from 48 % in spring to 70 % in autumn despite a relatively low portion of forest food products in the local inhabitants' diet. Since the ^{137}Cs decrease in forest ecosystems depends directly on the physical decay of the radionuclide, as was shown by the simulation results, inhabitants of rural settlements, located next to the forests, are at risk. The mathematical model developed can be used in forming of the consumer basket for the population of radioactively contaminated regions.

Acknowledgements

Authors express their gratitude to the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine for providing data on contamination of forest ecosystems and forest products, and to Dr. I. I. Yaskovets for the considerable advices in model developing, sector manager E. I. Solianyk, a leading specialist M. S. Umansky, who led gamma spectrometry measurements.

REFERENCES

1. Fesenko SV, Voigt G, Spiridonov SI, Sanzharova NI, Gontarenko IA, Belli M, Sansone U. Analysis of the contribution of forest pathways to the radiation exposure of different population groups in the Bryansk region of Russia. *Radiat Environ Biophys.* 2000;39:291-300.
2. Bulko NI, Shabaleva MA, Kozlov AK, Tolkacheva NV, Mashkov IA. The ^{137}Cs accumulation by forest-derived products in the Gomel

- J. Environ. Radioact.* 2014. Vol. 127. P. 150-154. doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.02.003.
3. Соціально-екологічні чинники споживчої поведінки населення на радіоактивно забруднених територіях Полісся / Д. П. Качур, П. В. Замостян, Г. П. Паньковська, Л. А. Райчук, М. Д. Кучма, А. В. Святецька. *Агроекологічний журнал*. 2010. Спецвипуск. С. 106–110.
 4. Possibility of monitoring internal irradiation doses in the heavily contaminated Zone at the late stage of Chernobyl accident / V. S. Repin, O. A. Bondarenko, N. Yu. Novak, N. I. Tsygankov, B. B. Aryasov. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 1998. Vol. 79. № 1-4. P. 183–186.
 5. Assessing internal exposures and the efficacy of countermeasures from whole body measurements / I. Likhtarev, L. Kovgan, R. Gluvchinskiy, O. Perevoznikov, M. Morrey, L. Prossen et al. *First international conference «The radiological consequences of the Chernobyl accident»* (Minsk, Belarus, 18–22 March, 1996). Luxembourg : European Commission, 1996. P. 295–308.
 6. Бощенко В. В., Вербельчук С. П., Вербельчук Т. В. Особливості забруднення ^{90}Sr та ^{137}Cs різних ланок трофічного ланцюга в умовах природних екосистем Полісся України в післячорнобильський період. *Вісник ДААУ*. 2001. № 1. С. 39–42.
 7. Screening for ^{137}Cs body burden due to the Chernobyl accident in Korosten city, Zhitomir, Ukraine: 1996-2008 / N. Hayashida, Y. Sekitani, A. Kozlovsky, R. Rafalsky, A. Gutevich, V. Daniliuk et al. *J. Radiat. Res.* 2011. Vol. 52(5), P. 629-633. doi: 10.1269/jrr.11017.
 8. The role of the forest products in the formation of internal exposure doses to the population of Russia after the Chernobyl accident. / G. J. Bruk, N. V. Shutov, I. G. Travnikova, M. I. Balonov, M. V. Kaduka, L. N. Basalaeva. *Contaminated Forests* / ed. by I. Linkov, W. R. Schell. 1999. P. 343-352. doi: 10.1007/978-94-011-4694-4_36. (Nato Science Series 2: Environmental Security. Vol. 58).
 9. Методические рекомендации по проведению измерений с использованием счетчиков излучения человека при дозиметрической паспортизации населенных пунктов / Минчернобыль Украины, НЦРМ АМН Украины. Киев, 1995. 39 с.
 10. Методичний посібник з організації проведення науково-дослідних робіт в галузі сільськогосподарської радіології в системі Міністерства сільського господарства і продовольства України. Київ, 1992. 127 с.
 11. Інструкція з відбору та підготовки зразків для радіометричного контролю продукції лісового господарства. Київ, 1998. 78 с.
 12. Юнатов А.А. Заложение экологических профилей и пробных площадей // *Полевая геоботаника* / под ред. Е. М. Лавренко, А. А. Корчагина. Т. III. М.-Л. : Наука, ЛО, 1964. С. 9–35.
 13. Райчук Л.А. Роль лісових екосистем у формуванні доз опромінення населення Українського Полісся : дис. ... канд. с.-г. наук: 03.00.16. Нац. акад. аграр. наук України, Ін-т агрокол. і природокористування. Київ, 2012. 172 с.
 14. Estimated association between dwelling soil contamination and internal radiation contamination levels after the 2011 Fukushima Daiichi nuclear accident in Japan / M. Tsubokura, S. Nomura, K. Sakaiharu, S. Kato, C. Leppold, T. Furutani et al. *BMJ Open*. 2016. Vol. 6. P. e010970. doi:10.1136/bmjopen-2015-010970.
 - region. *J Environ Radioact.* 2014;127:150-4. doi: 10.1016/j.jenvrad.2013.02.003.
 3. Kachur DP, Zamostian PV, Pankovskaya GP, Raichuk LA, Kuchma MD, Sviatetska AV. [Socio-ecological factors of consumer behavior of the population in radioactively contaminated territories of Polissya]. *Agroecological Journal*. 2010;(Special edition):106-10. Ukrainian.
 4. Repin VS, Bondarenko OA, Novak NYu, Tsygankov NI, Aryasov BB. Possibility of monitoring internal irradiation doses in the heavily contaminated Zone at the late stage of Chernobyl accident. *Radiat Prot Dosimetry*. 1998;79(1-4):183-6.
 5. Likhtarev I, Kovgan L, Gluvchinskiy R, Perevoznikov O, Morrey M, Prossen L, et al. Assessing internal exposures and the efficacy of countermeasures from whole body measurements. In: *The radiological consequences of the Chernobyl accident First international conference; 1996 March 18-22; Minsk, Belarus*. Luxembourg: European Commission, 1996. p. 295-308.
 6. Boschenko W, Verbelchuk SP, Verbelchuk TV. [Features of ^{90}Sr and ^{137}Cs contamination of different parts of the trophic chain in conditions of natural ecosystems of the Polissya of Ukraine in the post-Chornobyl period]. *Visnyk DAAU*. 2001;(1):39-42. Ukrainian.
 7. Hayashida N, Sekitani Y, Kozlovsky A, Rafalsky R, Gutevich A, Daniliuk V, et. al. Screening for ^{137}Cs body burden due to the Chernobyl accident in Korosten city, Zhitomir, Ukraine: 1996-2008. *J Radiat Res*. 2011;52(5):629-33. doi: 10.1269/jrr.11017.
 8. Bruk GJ, Shutov VN, Travnikova IG, Balonov MI, Kaduka MV, Basalaeva LN. The Role of the Forest Products in the Formation of Internal Exposure Doses to the Population of Russia after the Chernobyl Accident. In: Linkov I, Schell WR, editors. *Contaminated Forests*. NATO Science Series (Series 2: Environmental Security), vol 58. Springer, Dordrecht; 1999. doi.org/10.1007/978-94-011-4694-4_36
 9. [Methodical recommendations for conducting measurements using whole body counters for dosimetric certification of settlements]. *Minchernobyl Ukraine, NTsRM AMN Ukrainy*. Kiev; 1995. 39 p. Russian.
 10. [Methodical manual on the organization of scientific research conducting in the field of agricultural radiology in the system of the Ministry of Agrarian Policy and Food of Ukraine]. *Kyiv*; 1992. 127 p. Ukrainian.
 11. [Instructions for the collection and preparation of samples for the radiometric control of forestry products]. *Kyiv*; 1998. 78 p. Ukrainian.
 12. Yunatov AA. [The establishment of ecological profiles and trial plots]. In: Lavrenko EM, Korchahyna AA, editors. *[Field geobotanics]*. Vol. III. М.-Л.: Science, Leningrad Branch; 1964. p. 9-35. Russian.
 13. Raichuk LA. [The role of forest ecosystems in forming of doses of Ukrainian Polissya population exposure doses] [dissertation]. *Kyiv: Institute of Agroecology and Environmental Management of*

15. Evaluation of the relationship between current internal ¹³⁷Cs exposure in residents and soil contamination west of Chernobyl in Northern Ukraine / Y. Kimura, Y. Okubo, N. Hayashida, J. Takahashi, A. Gutevich, S. Chorniy et al. *PLoS One*. 2015. Vol. 10(9). P. e0139007. doi: 10.1371/journal.pone.0139007.
16. Bernhardsson C., Zvonova I., Raaf C., Mattsson S. Measurements of long-term external and internal radiation exposure of inhabitants of some villages of the Bryansk region of Russia after the Chernobyl accident. *Sci. Total Environ*. 2011. Vol. 409(22). P. 4811–4817. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.066.
17. Quantifying annual internal effective ¹³⁷Cesium dose utilizing direct body-burden measurement and ecological dose modeling / B. A. Jelin, W. Sun, A. Kravets, M. Naboka, E. I. Stepanova, V. Y. Vdovenko et al. *J. Exp. Sci. Environ. Epidemiol*. 2016. Vol. 26(6). P. 546–553. doi: 10.1038/jes.2015.6.
18. Райчук Л. А. Елементи методики оцінювання формування дози внутрішнього опромінення населення на віддаленому етапі подолання наслідків аварії на Чорнобильській АЕС. *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*. 2014. Вип. 24.07. С. 150–156.
19. Оцінювання формування дози внутрішнього опромінення населення на віддаленому етапі подолання наслідків аварії на ЧАЕС / Г. М. Чоботько, В. П. Ландін, Л. А. Райчук, І. К. Швиденко, М. С. Уманський. *Вісник аграрної науки*. 2015. № 7. С. 54–58.
20. Чоботько Г. М., Пісковий Ю. М., Перетятко Є. Є., Райчук Л. А. Вплив екосистем на дозове навантаження населення, що мешкає в третій та четвертій зонах радіоекологічного контролю Українського Полісся. *Збірник матеріалів міжнародної науково-практичної конференції «Біогіохімічні аспекти збереження здоров'я людини»* (8-9 квітня 2010 р., Ужгород). Ужгород, 2010. С. 107–110.
21. Tsukada H., Shibata H., Sugiyama H. Transfer of radiocaesium and stable caesium from substrata to mushrooms in a pine forest in Rokkasho-mura, Aomori, Japan. *J. of Environ. Radioact*. 1998. Vol. 39(2). P. 149–160.
22. Модель формирования эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения после Чернобыльской аварии / И. А. Лихтарев, Л. Н. Ковган, Д. В. Новак и др. *Материалы научной конференции «Актуальные вопросы ретроспективной, текущей и прогнозной дозиметрии облучения в результате Чернобыльской аварии»* (27–29 октября 1992 г.) Киев, 1993. С. 40–70.
23. Berg M. T., Shumann L. J. A three-dimensional stochastic model of the behavior of radionuclides in forest I. Model structure. *Ecological Modelling*. 1995. Vol. 83(3). P. 359–372.
24. Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. Final report on the BIOMASS Forest Working Group activities 1998-2000 / International Atomic Energy Agency. Vienna : IAEA, 2000. 125 p.
25. Seymour E. M. Mitchell P. I., Leon Vintro L., Little D. J. A model for the transfer and recycling of Cs-137 within a deciduous forest ecosystem. *Contaminated Forests* / ed. by I. Linkov, W. R. Schell. 1999. P. 203-215. doi.org/10.1007/978-94-011-4694-4_22 (Nato Science Series 2: Environmental Security. Vol. 58).
- National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, 2012. 172 p. Ukrainian.
14. Tsubokura M, Nomura S, Sakaiharu K, Kato S, Leppold C, Furutani T, et.al. Estimated association between dwelling soil contamination and internal radiation contamination levels after the 2011 Fukushima Daiichi nuclear accident in Japan. *BMJ Open*. 2016;6:e010970. doi:10.1136/bmjopen-2015-010970.
15. Kimura Y, Okubo Y, Hayashida N, Takahashi J, Gutevich A, Chorniy S, et.al. Evaluation of the relationship between current internal ¹³⁷Cs exposure in residents and soil contamination west of Chernobyl in Northern Ukraine. *PLoS One*. 2015;10(9):e0139007. doi: 10.1371/journal.pone.0139007.
16. Bernhardsson C, Zvonova I, Raaf C, Mattsson S. Measurements of long-term external and internal radiation exposure of inhabitants of some villages of the Bryansk region of Russia after the Chernobyl accident. *Sci. of the Total Environ*. 2011;409(22): 4811-17. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.07.066.
17. Jelin BA, Sun W, Kravets A, Naboka M, Stepanova EI, Vdovenko VY, et.al. Quantifying annual internal effective ¹³⁷Cesium dose utilizing direct body-burden measurement and ecological dose modeling. *J. of Exp. Sci. and Environ. Epidemiol*. 2016;26(6):546-53. doi: 10.1038/jes.2015.6.
18. Raichuk LA. [The elements of the technique for evaluating the population internal irradiation doses formation to the remote stage of consequences of the Chernobyl NPP accident overcoming]. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2014;24.07:150-6. Ukrainian.
19. Chobotko HM, Landin VP, Raichuk LA, Shvydenko IK, Umanskiy MS. [Assessment of formation of the dose of internal irradiation of population at the remote stage of overcoming of aftereffects of Chernobyl disaster]. *News of agrarian sciences*. 2015;7:54-8. Ukrainian.
20. Chobotko HM, Piskovyi YuM, Peretiatio Yele, Raichuk LA. [Influence of ecosystems on the dose load of the population living in the third and fourth zones of radioecological control of the Ukrainian Polissya]. In: [Biogeochemical aspects of human health preservation]: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference; 2010 Apr 8-9; Uzhhorod, Ukraine. Uzhhorod; 2010; p. 107-10. Ukrainian.
21. Tsukada H, Shibata H, Sugiyama H. Transfer of radiocaesium and stable caesium from substrata to mushrooms in a pine forest in Rokkasho-mura, Aomori, Japan. *J Environ Radioact*. 1998;39(2):149-60.
22. Lykhtarev YA, Kovhan LN, Novak DV, et. al. [The model of formation of an effective equivalent dose of external exposure after the Chernobyl accident]. In: Topical issues of retrospective, current and forecast dosimetry of irradiation as a result of the Chernobyl accident: Proceedings of the Scientific Conference; 1992 Oct. 27-29; Kiev, Ukraine. Kiev; 1993. p. 40-70. Russian.
23. Berg MT, Shumann LJ. A three-dimensional stochastic model of the behavior of radionuclides in forest I. Model structure. *Ecological Modelling*. 1995;83(3): 359-72.

26. Shaw G, Avila R., Venter A., et al. Radionuclide migration in forest ecosystems e results of a model validation study. *J. of Environ. Radioactiv.* 2005. Vol. 84. P. 285–296.
27. Schell W.R., Linkov I., Mytternaere C., Morel B. A dynamic model for evaluating radionuclide distribution in forest from nuclear accidents. *Health Phys.* 1996. Vol. 70(3). P. 318–335.
28. Riesen T. K., Avila R., Moberg L., Hubbard L. Review of forest models developed after the Chernobyl NPP accident. *Contaminated Forests* / ed. by I. Linkov, W. R. Schell. 1999. P. 151–160. doi.org/10.1007/978-94-011-4694-4_17. (Nato Science Series 2: Environmental Security. Vol. 58).
29. Goor F., Avila R. Quantitative comparison of models of ¹³⁷Cs cycling in forest ecosystems. *Environ. Modell. & Software.* 2003. Vol. 18. P. 273-279.
30. Ясковець І. І., Тарасенко Р. О. Методичний посібник з дисципліни «Моделювання та прогнозування стану довкілля» з використанням математичного пакету MAPLE. Київ : Національний аграрний університет. 2004. 79 с.
31. Чоботко Г. М., Райчук Л. А., Ландін В. П., Пісковий Ю. М. Формування дози внутрішнього опромінення населення Українського Полісся внаслідок споживання харчових продуктів лісового походження. *Агро-екологічний журнал.* 2011. № 1. С. 37–42.
24. Modelling the migration and accumulation of radionuclides in forest ecosystems. Final report on the BIOMASS Forest Working Group activities 1998-2000. ISSN 1011-4289. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2000. 125 p.
25. Seymour EM, Mitchell PI, Vintro LL, Little DJ. A Model for the transfer and recycling of Cs-137 within a deciduous forest ecosystem. In: Linkov I, Schell WR, editors. *Contaminated Forests*. NATO Science Series (Series 2: Environmental Security), vol 58. Springer, Dordrecht; 1999. doi.org/10.1007/978-94-011-4694-4_22
26. Shaw G, Avila R, Venter A, et al. Radionuclide migration in forest ecosystems e results of a model validation study. *J Environ Radioactiv.* 2005;84:285-96.
27. Schell WR, Linkov I, Mytternaere C, Morel B. A dynamic model for evaluating radionuclide distribution in forest from nuclear accidents. *Health Phys.* 1996;70(3):318-35.
28. Riesen TK, Avila R, Moberg L, Hubbard L. Review of forest models developed after the Chernobyl NPP accident. In: Linkov I, Schell WR, editors. *Contaminated Forests*. NATO Science Series (Series 2: Environmental Security), vol 58. p. 151-60. Springer, Dordrecht; 1999. doi.org/10.1007/978-94-011-4694-4_17
29. Goor F., Avila R. Quantitative comparison of models of ¹³⁷Cs cycling in forest ecosystems. *Environ. Modell. & Software.* 2003;18:273-79.
30. Iaskovets II, Tarasenko RO. [Methodical manual on discipline «Modeling and forecasting of the environment» using the mathematical package MAPLE]. Kyiv: National Agrarian University; 2004. 79 p. Ukrainian.
31. Chobotko HM, Raichuk LA, Landin VP, Piskovyi YuM. [Forming of internal irradiation dose of population of Ukrainian Polis'ya for account of foodstuffs of forest origin]. *Agroecological journal.* 2011;(1):37-42. Ukrainian.

Стаття надійшла до редакції 4.04.2018

Received: 4.04.2018