

---

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕКОЛОГІЧНИХ І СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНИХ ЧИННИКІВ НА ФОРМУВАННЯ ДОЗИ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ НАСЛЕННЯ УКРАЇНСЬКОГО ПОЛІССЯ У ВІДДАЛЕНИЙ ПЕРІОД ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧАЕС

---

Райчук Л. А., Швиденко І. К., Чоботько Г. М.  
DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-511-2-9>

### ВСТУП

Радіоактивне забруднення довкілля є предметом особливої стурбованості українського суспільства, оскільки проживання людини на радіоактивно забруднених територіях зумовлює певний ступінь ризику отримання внутрішнього опромінення. Особливо гостро ця проблема постала в останнє десятиліття, коли світ почав переходити на «зелені» економічні рейки, а також зіткнувся з проблемою глобальної продовольчої кризи. Радіоактивне забруднення територій призвело до зміни структури землекористування та господарської спеціалізації постраждалих регіонів внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС загалом, що поглибило еколого-економічну і соціальну кризи. На сьогодні ситуація вимагає від держави прискореного переходу на інноваційні технології ведення виробництва, у тому числі аграрного, що потребує проведення попередньої адекватної оцінки екологічних умов регіону.

Не зважаючи на масштабні контрзаходи, здійснені на сільськогосподарських угіддях і в населених пунктах у післяаварійний період, і досі у 10 населених пунктах Українського Полісся річна доза населення перевищує 1 мЗв/рік<sup>1</sup>. Результати досліджень<sup>2</sup> свідчать, що сільське населення Українського Полісся, в т.ч. діти, споживає харчові

---

<sup>1</sup> Jacob P, Fesenko S, Firsakova S, Likhtarev I, Schotola C, Alexakhin R, Zhuchenko Y, Kovgan L, Sanzharova N, Ageyets V. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident. *J. of Environ. Radioactiv.* 2001;**56**(1-2):51–76. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00047-9.

<sup>2</sup> Labunska I, Kashparov V, Levchuk S, Santillo D, Johnston P, Polishchuk S, Lazarev N, Khomutinin Y. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures. *Environment International.* 2018;**117**: 250–59. doi: 10.1016/j.envint.2018.04.053.

продукти, рівень радіоактивного забруднення яких в декілька разів перевищує гігієнічні нормативи. Причому ризик постійного додаткового внутрішнього опромінення стосується переважно сільського населення. Причини такої специфіки до теперішнього часу вивчені недостатньо, що ускладнює реалізацію збалансованого розвитку агросфери Українського Полісся і сталого розвитку регіону загалом. Достовірна оцінка як поточних, так і накопичених доз може бути здійснена на основі ретельного вивчення чинників, що впливають на їх формування.

Частка споживання певних харчових продуктів, а також рівень їх радіоактивного забруднення істотно залежить від низки соціально-економічних чинників, що характеризують певний населений пункт або регіон. Результати низки досліджень показали чітку специфіку раціону сільських мешканців у різних частинах Українського Полісся, а також виявили тенденції зміни споживчої поведінки місцевого населення<sup>3</sup>. Власне, відмінності у формуванні дози внутрішнього опромінення чітко простежуються на територіях як з високою, так і низькою щільністю радіоактивного забруднення, і вони залишаються стійкими у часі.

Недоліком загальноприйнятого аналізу доз внутрішнього опромінення населення є те, що він заснований на припущенні про надходження <sup>137</sup>Cs в організм людини переважно внаслідок споживання молока та картоплі, а також не враховує вплив контрзаходів, які дещо зменшують рівень радіоактивного забруднення їжі (молоко, картопля, овочі, м'ясо). Також унаслідок погіршення соціально-економічних умов у раціоні сільського населення зросла частка лісових продуктів (грибів, ягід, дичини)<sup>4</sup>. Існуючі моделі розрахунку дози внутрішнього опромінення не враховують багато непрямих чинників, які впливають на надходження <sup>137</sup>Cs у організм людини, і не здатні гнучко і адекватно реагувати на зміну соціально-економічної ситуації чи кліматичні коливання<sup>5</sup>.

Оскільки для коректної оцінки доз опромінення населення, моніторингу радіоактивного забруднення сільгоспугідь поблизу населених пунктів та продуктів харчування вже недостатньо, потрібне

---

<sup>3</sup> Kachur DP, Zamostian PV, Pankovska HP, Raychuk LA, Kuchma MD, Sviatetska AV. Socio-ecological factors of consumer behavior of the population in radioactively contaminated Polissya territories. *Agroecological journal*. 2010;Special issue:106–10.

<sup>4</sup> Thirty years after Chernobyl catastrophe: radiological and health effects: National report of Ukraine. Kyiv, SI "National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences". 2016;177 p.

<sup>5</sup> Omelianets MI, Khomenko IM. Evaluation of influence of radiological protection measures on internal irradiation levels in population of radioactively contaminated territories of Ukraine. *Hyg. of Sett.* 2013;61:237–43.

грунтового дослідження закономірностей формування дозового навантаження та виявлення основних дозоутворюючих чинників.

## **1. Виявлення основних тенденцій формування дози внутрішнього опромінення мешканців Полісся України у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС**

Загалом, нині радіаційна ситуація на забруднених територіях порівняно з раннім поставарійним періодом значно покращилась. За офіційними даними останньої загальнодозиметричної паспортизації<sup>6</sup> уже більше 10 років тому в Україні за межами зони відчуження не було населених пунктів, які відповідали б критеріям 2-ї зони радіоактивного забруднення, і тільки 111 населених пунктів з 841 відповідали 3-й зоні. За останніми оцінками<sup>7</sup>, наразі менше ніж у 30 населених пунктах Житомирської і Рівненської областей середньорічна ефективна доза опромінення населення може перевищувати допустимий рівень в 1 мЗв, що відповідає 3-й зоні радіоактивного забруднення. При цьому, основний внесок у сумарну середню річну ефективну дозу дає внутрішня доза опромінення, обумовлена споживанням місцевих продуктів харчування. Аналіз розподілу дози внутрішнього опромінення мешканців Київського Полісся надав можливість виявити вагомі відмінності значення цього показника залежно від сезону року. Восени спостерігається як зростання індивідуальних доз внутрішнього опромінення у переважній більшості обстежених, так і збільшення кількості осіб з аномально високими рівнями опромінення.

Доза внутрішнього опромінення є своєрідною інтегральною характеристикою радіаційної критичності ландшафтів, що прилягають до певного населеного пункту, а також опосередкованою характеристикою соціально-економічних умов території. Це тому, що вона формується внаслідок дії комплексу різноманітних чинників: соціальних (вік, стать, рівень освіченості, поведінкові звички, традиції у сільськогосподарській діяльності тощо), економічних (рівень доходу сім'ї, сфера зайнятості, рівень безробіття в регіоні, відповідність норм ведення сільськогосподарської діяльності рекомендованим для регіону), екологічних (грунти, екосистеми, рівень забруднення тощо). Дозовий чинник було запропоновано вважати визначальним при

---

<sup>6</sup> Ліхтарьов І.А., Ковган Л.М., Василенко В.В. та ін. (2012). Загальнодозиметрична паспортизація та результати ЛВЛ-моніторингу в населених пунктах України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської катастрофи. Дані за 2011 р. Збірка 14. Київ: (б. в.). 33 с.

<sup>7</sup> Vasylenko V.V., Nechaev S.Y., Tsigankov M.Y. et al. Results Of Comprehensive Radiological & Hygienic Monitoring In Some Settlements Of Radiologically Contaminated Areas In Rivne Region In 2017. Problems of Radiation Medicine and Radiobiology. 2018. № 23. P. 139-152. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-139-152>.

визначенні радіоекологічної критичності території та можливості перегляду меж зон радіоекологічного забруднення.

Оскільки у сумарній дозі опромінення населення домінує частка внутрішнього опромінення, для аналізу потенційного ризику екосистем з погляду їх впливу на формування радіаційного навантаження на місцевих мешканців доцільно проаналізувати раціон харчування останніх. Так, у ньому як навесні, так і восени переважає горошина (46 і 59% відповідно). Значним є споживання молока, хоча слід зазначити, що у зв'язку із занепадом тваринництва в регіоні відсоток молочних продуктів у раціоні харчування місцевого населення зменшився і становить у середньому 23% навесні та 13% восени. Водночас восени зростає частка харчових продуктів лісового походження (до 12%). При цьому співвідношення компонентів раціону коливається по областях. Скажімо, для Волинської обл. характерною є більша частка споживання молока і молочних продуктів. Водночас для мешканців півночі Житомирської обл. традиційним є значне споживання продуктів лісового походження. Дослідження річного доходу мешканців регіону показало, що молоко, гриби і ягоди стали товарною одиницею. Тому споживання цих продуктів місцевим населенням у деяких населених пунктах зменшилося, а об'єм власного виробництва і споживання овочевої продукції по п'яти областях Полісся зріс у середньому на 10 %. Однак, незважаючи на порівняно невисоку частку харчових продуктів лісового походження у раціоні мешканців північної частини Українського Полісся, їх внесок у дозу внутрішнього опромінення становить у середньому від 48% навесні до 70% восени. Структура доз внутрішнього опромінення населення Західного Полісся (переважно Волинська та Рівненська області) характеризується відчутним переважанням молочної компоненти (до 80% структури дози внутрішнього опромінення місцевого населення). Для Київської, частини Житомирської і Чернігівської областей основну роль у формуванні дозового навантаження відіграє овочева продукція, що переважає у раціоні харчування.

З метою встановлення особливостей та тенденцій формування дози внутрішнього опромінення сільського населення Українського Полісся внаслідок сукупної дії природних та соціальних чинників проаналізовано результати ЛВЛ-вимірювання сільських мешканців Вишгородського району (територія дослідження 1, SS1) та Народицького району (територія дослідження 2, SS2), Київської та Житомирської областей відповідно (рис. 1).

Ці райони були обрані з огляду на їхню репрезентативність для сільської місцевості Українського Полісся, що дає змогу врахувати якомога більше характеристик регіону. SS1 характеризується

переважанням дерново-підзолистих ґрунтів, відносно низькою щільністю поверхневого забруднення  $^{137}\text{Cs}$  (48,88 кБк/м<sup>2</sup>), більшим розмірами поселень (середня кількість населення в селі – 1575 чол.) і меншою, порівняно з SS2, доступністю лісових продуктів харчування (середня відстань до найближчого лісу – 13,35 та 1,89 км відповідно). Водночас, SS2 характеризується високим рівнем забруднення території  $^{137}\text{Cs}$  (230,33 кБк/м<sup>2</sup>), невеликими населеними пунктами (середня кількість населення в селі – 778 чол.), доступністю продуктів харчування лісового походження (відстань до найближчого лісу – 1,89 км) і наявністю лучних ґрунтів.



**Рис. 1. Досліджувані регіони зони Українського Полісся:  
1 – Київське Полісся (SS1), 2 – Житомирське Полісся (SS2)**

Інформацію про сільське населення було надано місцевими сільськими радами. Припущення та висновки стосовно ймовірного закону розподілу доз внутрішнього опромінення ґрунтуються на результатах описової статистики ЛВЛ-вимірювань населення SS1 та SS2 (всього 2993 виміри) та апроксимації типів розподілу. Слід зазначити, що у віддалений період після аварії на ЧАЕС для переважної більшості сільських населених пунктів, які зазнали впливу аварії, характерний логнормальний розподіл доз внутрішнього випромінювання, однак останнім часом простежуються дещо інші закономірності, зокрема, експоненційний розподіл доз.

Близькість середньоквадратичних відхилень (0,05 мЗв/рік і 0,21 мЗв/рік для SS1 і SS2, відповідно) і середніх арифметичних (0,06 мЗв/рік і 0,18 мЗв/рік для SS1 та SS2, відповідно), а також високі значення коефіцієнта асиметрії (3,50 і 7,24 для SS1 і SS2, відповідно) і коефіцієнта варіації (86,7 % і 117,3 % для SS1 і SS2, відповідно) для обох досліджуваних груп населених пунктів свідчать про експоненційний розподіл (табл. 1). Однак близькість логарифму медіани і середнього арифметичного логарифмів варіантів (-1,27 і -1,32 для SS1, -0,86 і -0,82

для SS2, відповідно) є ознакою логнормального розподілу, а близькість середнього арифметичного і медіани (0,054 мЗв/рік для SS1, 0,137 мЗв/рік для SS2) – розподілу Гауса. Апроксимація експериментальних даних з інтервалом 0,01 мЗв/рік (рис. 2) підтвердила гіпотезу щодо експоненційного розподілу для SS1 і розподілу Гауса для SS2.

Таблиця 1

**Коротка характеристика населених пунктів  
досліджуваних районів**

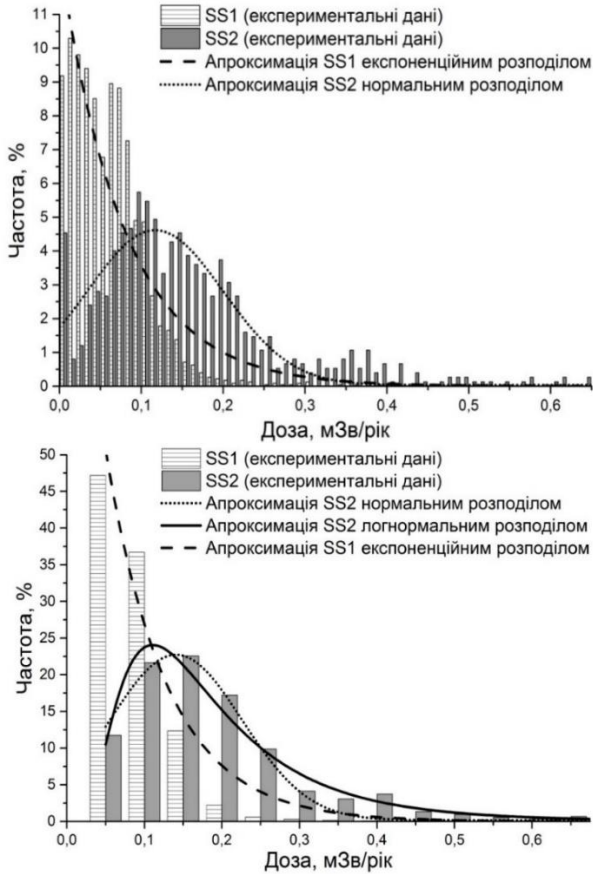
Показник		SS1	SS2
Середньорічна ефективна доза внутрішнього опромінення, мЗв/рік	max	0,64	3,30
	min	МДА*	МДА*
	середнє	0,06	0,18
Середня кількість населення в населеному пункті, чол.		1575,38	777,50
Площа лісу в радіусі 3 км від населеного пункту, км <sup>2</sup>		9,44	8,62
Рівень забруднення території <sup>137</sup> Cs, кБк/м <sup>2</sup>		48,88	230,33
Зона радіоактивного забруднення (відповідно до законодавства України)		відсутня	2,30
Переважаючі типи ґрунтів		Дерново-підзолисті	Дерново-підзолисті, лучні
Середня відстань до найближчого районного центру, км		1,31	24,35
Середня відстань до найближчого лісового масиву, км		13,35	1,89

\*МДА – нижче за мінімальну детектовану активність ЛВЛ.

Однак при зміні дискретного інтервалу (збільшення до 0,05 мЗв/рік) (рис. 2), вибірка даних для SS2 проявила характеристики логнормального розподілу.

Таким чином, для SS1 за критерієм Пірсона прийнята гіпотеза про експоненційний закон розподілу. Особливістю процесів, які описуються цим розподілом, є стабільність у певних умовах. Для населених пунктів SS2 та подібних до них характерними є схожі незмінні або малозмінні соціально-економічні умови, які передбачають певний раціон харчування і рівень забруднення їжі радіонуклідами, який зменшується переважно внаслідок природного радіоактивного розпаду. Зважаючи на те, що соціально-демографічні та економічні характеристики сільської місцевості Полісся України є відносно незмінними, існують певні підстави очікувати, що експоненційний закон розподілу індивідуальної дози внутрішнього опромінення населення буде притаманним для багатьох сільських населених пунктів регіону<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Чоботько Г.М., Райчук Л.А., Ландін В.П. Особливості та проноз внутрішнього опромінення сільського населення Українського Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС (моніторингове дослідження). Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. Problems of radiation medicine and radiobiology. 2018. Вип. 23. С. 216–228.



**Рис. 2. Графічна інтерпретація закону розподілу дози внутрішнього опромінення сільського населення SS1 і SS2 (дискретний інтервал 0,01 і 0,05 мЗв/рік)**

Розподіл дози внутрішнього опромінення для населення SS2 має ознаки як логнормального, так і Гаусового розподілів. Отже, можна припустити, що статистична сукупність формується внаслідок впливу значної кількості незалежних (або слабо залежних) випадкових величин, жодна з яких не переважає. Однак деякі чинники, що впливають на формування цієї сукупності, за певних умов можуть переважати (наприклад, певні продукти харчування).

Таким чином, обидві території дослідження характеризуються певним переліком різних соціально-економічних та екологічних

чинників, які визначають особливості дози внутрішнього опромінення сільського населення і повинні бути враховані при оцінюванні і прогнозуванні дозового навантаження. Такий підхід узгоджується з теорією<sup>9</sup>, яка стверджує, що характеристики людини чи групи людей зі схожою соціально-економічною поведінкою визначають певні особливості формування дози внутрішнього опромінення населення.

Таким чином, дозове навантаження є ще однією, комплексною характеристикою групи людей (сім'ї, населеного пункту чи району). Тому наступним доцільним кроком є визначення ймовірних найбільш значимих для формування дози внутрішнього опромінення чинників. Характеристика населеного пункту є, певним чином, сукупністю характеристик його мешканців<sup>10</sup>. Тому логічним є врахування таких персональних ознак, як рівень освіченості, рід занять, вік, стать тощо.

Серед загальних ознак населеного пункту можна виділити рівень радіоактивного забруднення території, переважаючий тип ґрунту, відстань до найближчого районного центру і лісового масиву, розмір поселення тощо<sup>11</sup>. Персональні характеристики, такі як рівень освіти, впливають на обізнаність та ставлення людини до радіоактивного забруднення, що значною мірою визначає споживчу поведінку. Тоді як рівень забруднення території, тип ґрунту, відстань до лісового масиву та найближчого районного центру визначають змогу (ймовірність) отримання мешканцями радіоактивно забруднених регіонів продуктів харчування з певним рівнем забруднення радіонуклідами.

Отже, можна вважати, що кожний населений пункт характеризується певним набором прямих і непрямих чинників формування дози внутрішнього опромінення, а отже, і її типовим середнім значенням. До прикладу, мешканці малих населених пунктів у лісистій місцевості, віддалених від районних центрів (Хотянівка, Рудня-Димерська, Рихта), з великою ймовірністю будуть споживати продукти харчування лісового походження, які, як відомо, є одними з найзабрудненіших. Тоді як мешканці порівняно великих поселень, розташованих поблизу районних центрів (Лебедівка, Нижча Дубечня, Толокин), матимуть змогу споживати їжу не місцевого походження. Тому ймовірність отримання ними відносно високих доз внутрішнього опромінення нижча, аніж у першій групі. Для виявлення впливу особистісних характеристик на формування споживчої поведінки та дозового навантаження на населення необхідним є комплексний аналіз чинників у розрізі окремих сімей.

---

<sup>9</sup> Skryabin A, Hille R. Evaluation of the population dose in relation to social and geographical factors after the Chernobyl accident. Julich, Forschungszentrum. 1998;75 p.

<sup>10</sup> Vlasova N.G. Doses assessment of population at long-term period after the Chernobyl accident. Radiation Hygiene. 2014;7(3):9–18. (available online). <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/37/54>.

<sup>11</sup> Landin V., Chobotko G., Raichuk L., Shvydenko I., Umanskyi M., Kichigina O., Teteruk O. The formation of current internal exposure doses of the Ukrainian Polissia rural population. Ukrainian Journal of Ecology, 2020, 10(6), 249–254. Doi: 10.15421/2020\_290



## **2. Встановлення основних чинників, які впливають на формування дози внутрішнього опромінення населення Полісся України**

При вивченні формування дози в групах однотипної соціальної поведінки мешканців населених пунктів досліджуваних районів взято за основу концепцію, відповідно до якої людина або група людей, яка має певні особистісні та соціально-економічні характеристики, взаємодіє з навколишнім природним середовищем проживання, сприяючи формуванню дози, яка є його властивістю. Тобто доза внутрішнього опромінення людини формується залежно від сприйняття нею фактора радіаційної небезпеки і її соціально-економічного статусу, пов'язаного з професійною діяльністю і соціальним становищем. Ставлення окремих осіб до радіаційної небезпеки пов'язано з їх особистісними характеристиками, такими як стать, рівень освіти, психоемоційний статус тощо. Тому розподіл дози в населеному пункті визначається особистісними характеристиками кожного з його жителів<sup>12</sup>. Крім того, кожна сім'я є соціальною системою і детермінує дії індивідів, які до неї належать. У межах сім'ї здійснюється безпосереднє споживання продуктів харчування. Отже, кожна сім'я характеризується «свою» дозою<sup>13</sup>. Таким чином, розподіл дози в окремому населеному пункті визначається ще й характеристиками кожної сім'ї. Це ж можна сказати і про населений пункт чи район. Очевидним також є те, що чим менший населений пункт і чим далі він розташований від локального центру, тим відносно гіршими є соціальні та економічні умови життя його жителів і більшим ступінь натуралізації в особистому підсобному господарстві. Відрізняється і демографічний склад населення: у малих поселеннях менше дітей, більше людей похилого віку. У силу цих причин споживання забруднених продуктів, а отже, і доза в малих поселеннях повинна бути вищою, ніж у великих. Існує залежність усередненої дози внутрішнього опромінення сільських жителів від чисельності жителів у населеному пункті: чим менше населений пункт, тим вища доза внутрішнього опромінення<sup>14</sup>. Це обумовлено тим, що кількість населення – інтегральний показник соціально-економічного рівня життя.

Такий підхід пояснює деякі закономірності дозоутворення, але пов'язаний з трудомістким збором непрямих даних про окремих людей або ж їх груп зі схожою поведінкою і залишає відкритими деякі питання. Наприклад, неможливо пояснити наявність високих доз внутрішнього опромінення у деяких людей, що проживають у сім'ях, інші члени яких

---

<sup>12</sup> Visenberg, Yu. V. and N. G. Vlasova. 2008. Rural settlements: social and ecological factors influencing on internal dose formation. IRPA 12: 12 International Congress of the International Radiation Protection Association, Argentina: SAR. 42(47): 42103486.

<sup>13</sup> Vlasova, N. G. and V. V. Stavrov. 2005. Role of a family in formation of internal dose at inhabitants of rural society. Med. Radiol. and Rad. Saf. 50(5): 22-28.

<sup>14</sup> Evaluation of the population dose in relation to social and geographical factors after the Chernobyl accident. 1997. The Cooperation Project № 07 GUS01/7 – Final report. Ulich, Germany.

мають значно нижчу дозу опромінення. Таким чином, для оцінки доз внутрішнього опромінення населення за умов нестачі або відсутності даних ЛВЛ-вимірів доцільно використовувати модельні уявлення, засновані на обліку основних і опосередкованих чинників формування дози внутрішнього опромінення. До основних дозоутворюючих факторів належать типи ґрунтів та рівень їх поверхневого забруднення, оскільки саме вони визначають інтенсивність переходу  $^{137}\text{Cs}$  з ґрунту в основну сільськогосподарську і лісову продукцію.

До непрямих факторів формування дози належать кількість жителів у поселенні, відстань до найближчого лісового масиву, площа лісу поблизу населеного пункту тощо. Ці непрямі фактори роблять найбільший внесок у формування дози внутрішнього опромінення, оскільки близькість лісу і слабо розвинена інфраструктура в малих і середніх поселеннях формує певний тип господарювання. Усе це, в кінцевому рахунку, формує харчову поведінку населення. Отже, можна припустити, що кожен населений пункт повинен характеризуватися цілком певним набором прямих і непрямих чинників, і, отже, властивою йому середньою дозою. Таким чином, нами було обрано для аналізу наступні показники: а) кількісні: вік особи на момент проведення ЛВЛ-обстеження, років; частка залісної площі в радіусі 3 км від населеного пункту, %; питома площа лісу на 1 люд. у радіусі 3 км від населеного пункту,  $\text{км}^2/\text{люд.}$ ; рівень забруднення території  $^{137}\text{Cs}$ ,  $\text{кБк}/\text{м}^2$ ; відстань до найближчого локального центру, км; відстань до найближчого лісового масиву, км; рік обстеження; місяць обстеження; б) якісні: переважаючий тип ґрунту в населеному пункті; професія особи; рівень освіти особи; зона радіаційного забруднення.

Такі показники було обрано з погляду ступеню їх впливу на значення дози внутрішнього опромінення та доступність таких даних без додаткових досліджень. Кожен з обраних показників тим чи іншим чином впливає на склад раціону харчування населення та рівень радіоактивного забруднення продуктів цього раціону. Скажімо, площа лісу поблизу населеного пункту та відстань до найближчого лісового масиву впливають на можливу кількість дикорослих грибів та ягід, які, як відомо, мають високі рівні забруднення радіонуклідами.

Вік особи теж визначає раціон харчування. Так, діти споживають більше молока та молочних продуктів, а в раціоні людей похилого віку переважають картопля та овочі місцевого виробництва, а також продукти харчування лісового походження<sup>15</sup>. Відстань до найближчого районного (локального) центру визначає доступність для місцевих мешканців продуктів, вироблених поза межами зони радіоактивного забруднення<sup>16</sup>. Особливо цікавим показником можна вважати професію

---

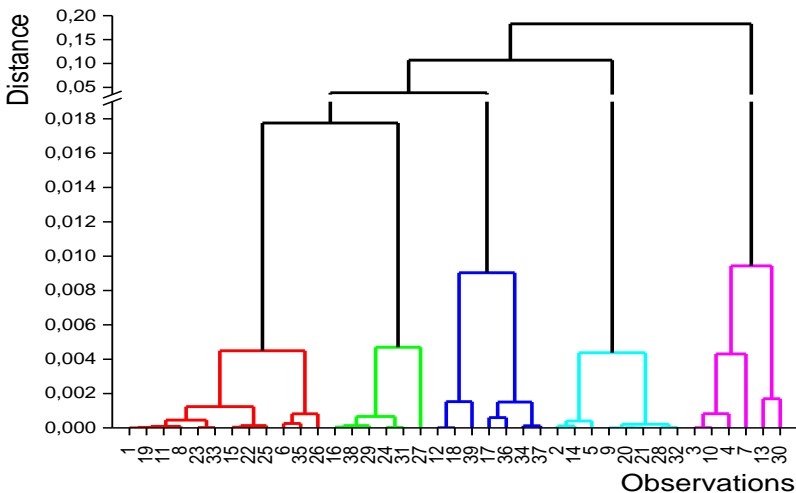
<sup>15</sup> Chobotko, G., V. Landin, L. Raichuk, I. Shvydenko, M. Umanskyi. 2015. Assessment of formation of the dose of internal irradiation of population at the remote stage of overcoming of aftereffects of Chernobyl disaster. *Agrovisnyk*. 7: 54–58.

<sup>16</sup> Jelin BA, Sun W, Kravets A, Naboka M, Stepanova EuI, Vdovenko VY, Karmaus WJ, Lichosherstov A, Svendsen ER. Quantifying annual internal effective  $^{137}\text{Cesium}$  dose utilizing

особи, оскільки вона деякою мірою визначається освітою, а, отже, визначає ставлення людини до фактора радіаційної небезпеки. Дослідження<sup>13</sup> показали, що на формування дози внутрішнього опромінення населення впливає не лише рівень освіченості кожної окремої людини, але й голови кожної окремої сім'ї. І наостанок, такі показники як рівень радіоактивного забруднення території, зона радіоактивного забруднення, переважаючий тип ґрунту та час, що минув після аварії на ЧАЕС, визначають ймовірні рівні забруднення харчових продуктів місцевого походження. Усі ці фактори є основою для побудови відповідних кластерів на базі подібності між окремими чинниками з метою наступного опису і аналізу.

На базі подібності між окремими дозоформуючими чинниками ми побудували кластери населених пунктів, використавши алгоритм кластеризації середнього зв'язку (group average) (рис. 3).

Відповідно кожен з обстежених населених пунктів було віднесено за середніми показниками дозоформуючих чинників до одного з кластерів<sup>3</sup>, і для кожного кластера було виявлено найбільш і найменш репрезентативні населені пункти за обраними основними чинниками. За результатами проведеного аналізу ми отримали 5 кластерів, кожен з яких відрізняється за низкою характеристик (рис. 4).

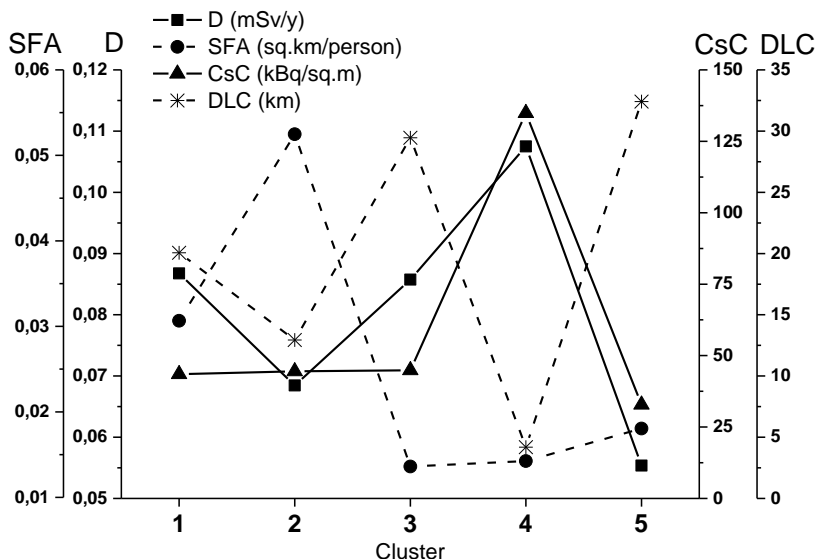


**Рис. 3. Дендрограма подібності населених пунктів за формуванням дози внутрішнього опромінення**

direct body-burden measurement and ecological dose modeling. J. of Expo. Sci. and Environ. Epidemiol. 2016;26(6):546–53. doi: 10.1038/jes.2015.6.

Таким чином, перший кластер характеризується усередненими значеннями за чотирма найбільш варіабельними показниками: доза, питома площа лісу на людину, рівень забруднення  $^{137}\text{Cs}$  території і відстань до найближчого локального центру. Для другого кластера характерна висока питома площа лісу. Третій кластер також характеризується низькою питомою площею лісу, але водночас порівняно великою відстанню до локального центру. Четвертому кластеру притаманні близька відстань до локального центру і залісеність прилеглої території, однак високі рівні забруднення  $^{137}\text{Cs}$  території та доза. Поселення останнього кластера характеризуються благополучною ситуацією стосовно радіаційного фактора, однак порівняно великою відстанню до локального центру<sup>17</sup>.

Отримані результати необхідно розглянути далі, щоб проаналізувати подібність кластерів, порівняти особливості формування дози внутрішнього опромінення у встановлених сукупностях населених пунктів у зв'язку з екологічними та соціально-економічними умовами.

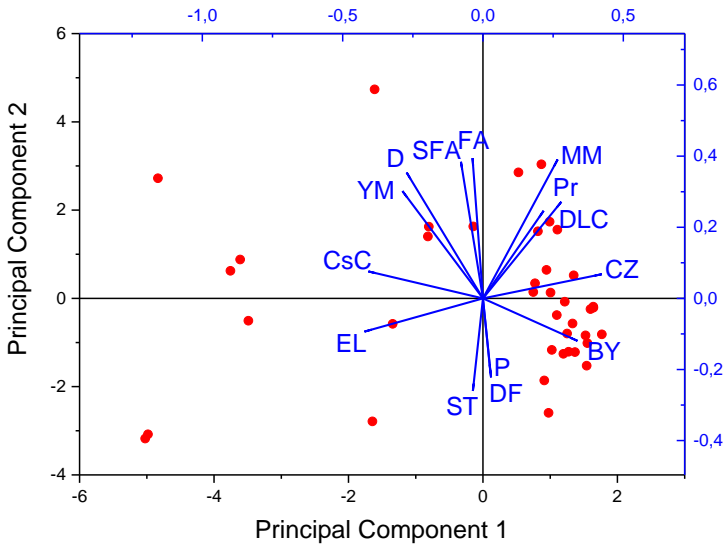


**Рис. 4. Подібність населених пунктів за основними характеристиками по кластерах**

<sup>17</sup> Chobotko H., Raichuk L., Cherniavskyi A., Liubashenko N., McDonald I. Complex analysis and mathematical modeling of the internal exposure dose of the Ukrainian Polissya rural population. Ядерна фізика та енергетика / NUCL. PHYS. AT. ENERGY, 20 (2019), 397-404.

Для з'ясування зв'язків між обраними чинниками та їх вплив на формування дози внутрішнього опромінення був використаний метод факторного аналізу – аналіз головних компонент (рис. 5). Цей метод описує дисперсію в наборі даних лінійно незалежними змінними.

Так, з даних рис. 2.4 видно, що доза внутрішнього опромінення найбільше залежить від рівня забруднення території ( $r=0.51$ ) та питомої площі лісу на 1 людину ( $r=0.60$ ). Також простежується залежність від року вимірювання ( $r=0.49$ ), що можна пояснити періодом напіврозпаду радіонукліду та специфічністю погодних умов та врожаю, зони радіоактивного забруднення ( $r=-0.42$ ), року народження ( $r=-0.32$ ) та типу ґрунту ( $r=0.30$ ). Залежність від віку можна пояснити особливостями дієти людей різного віку.



**Рис. 5. Подвійний графік головних компонент основних радіо-екологічних та соціально-економічних чинників та їх впливу на формування дози внутрішнього опромінення**

Аналіз основних компонент по кластерах показав деякі відмінності у досліджуваних групах населених пунктів (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння кластерів за корелюванням досліджуваних факторів з дозою внутрішнього опромінення населення (Г)

Кластер	Чинник											
	BY	YM	MM	P	FA	SEA	EL	СвС	CZ	ST	DLC	DF
1	-	-	-	-0,51	0,58	0,65	-	0,80	-0,55	-0,59	0,64	-
2	-0,06	0,59	0,77	-0,79	0,81	0,83	0,59	0,77	-	-0,51	0,51	-0,52
3	-	-	-	-	-	-	-	0,50	-	0,85	0,63	0,65
4	-	-	-	-0,51	-	-	-	0,57	-0,53	-	-	-
5	-0,55	0,80	0,99	-0,58	-	0,84	-	0,72	-	-0,89	0,71	-

Примітки: СУ – номер кластера; D – рівень дози внутрішнього опромінення, мЗв/р; P – населення, чол.; FA – в частині залежної площі є радіус 3 км від населеного пункту; %; SEA – питома площа лісу на 1 кв. м, в радіусі 3 км від населеного пункту; кв/год; EL – територіальний рівень осадних молекулів населеного пункту; СвС – рівень парабродіювання території; CZ; ST – переважачий тип ґрунту в населеному пункті; DLC – відстань до найближчого лісового масиву; DF – відстань до найближчого лісового масиву, км.

Закономірним є вплив рівня освіченості на значення дози для кластеру 2. Для кластерів 3 та 5 вагомим є вплив типу ґрунту, оскільки значення DLC порівно велике і населення в цих поселеннях споживає переважно продукти харчування місцевого походження. Очевидним є відсутність значного впливу CZ для 2, 3 та 5 кластерів. Вплив місяця вимірювання для кластеру 2 визначається, очевидно, часткою лісових грибів та ягід у раціоні місцевих мешканців, а для кластеру 5 – споживанням рослинної продукції місцевого походження залежно від сезону.

Таким чином, при подальшому моделюванні дози внутрішнього опромінення доцільно використати всі розглянуті чинники з метою збільшення точності результатів, оскільки кожен із цих чинників є важливим для тієї чи іншої групи населених пунктів.

### 3. Математичне забезпечення моделювання дози внутрішнього опромінення населення Українського Полісся

Для моделювання дози внутрішнього опромінення було вирішено використовувати багат шарову нейронну мережу (multilayer perceptron, MLP) зі зворотними зв'язками. У загальному випадку, нейронна мережа складається з вхідного шару нейронів, який отримує інформацію, вихідного шару, що повертає результат, та прихованих шарів, що розташовані посередині. Вхідні сигнали  $x_m$ , зважені ваговими коефіцієнтами  $\omega_m$ , додаються, результат передається до функції активації. Функція активації і повертає кінцевий результат. Кожен з шарів може містити довільну кількість нейронів, що залежить від поставленої задачі. Зазвичай, кількість нейронів у вхідному шарі дорівнює кількості одиниць даних (наприклад, факторів або характеристик), які подаються на вхід<sup>18</sup>. Прихованих шарів може бути декілька, а може і зовсім не бути. Їх мета – перетворення даних, які вони отримують, у той вигляд, в якому їх зможе використати наступний шар нейронів.

Установлення параметрів системи відбувається завдяки навчанню з учителем. Вхідний шар має містити 10 нейронів, які будуть приймати на вхід значення факторів по кожному ряду даних (рис. 6).

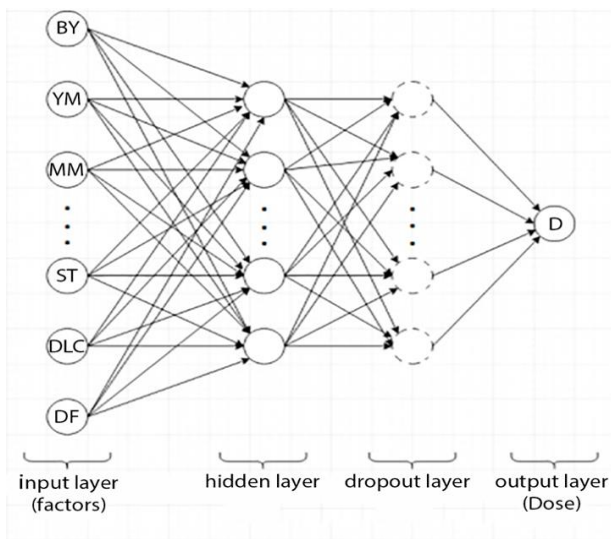


Рис. 6. Обрана архітектура нейронної мережі

<sup>18</sup> Nowlan S.J., Hinton G.E. Simplifying neural networks by soft weightsharing. Neural Computation, 4(4), 1992.

Прихований шар буде містити 12 нейронів. Таке значення було підібране в ході регулювання параметрів нейронної мережі. Наступний прихований шар має коефіцієнт відсіву, рівний 0.5 для утворення неповторних підмножин множини даних. Вихідний шар містить 1 нейрон, бо результатом є лише значення внутрішньої дози опромінення. Навчання буде відбуватися протягом 16 епох, а дані будуть передаватися пакетами, що містять 8 рядків даних. Такі параметри теж були обрані в ході регулювання структури моделі.

У вихідному шарі (input layer) використано попередньо обрані чинники, а саме наступні максимально проаналізовані показники: а) кількісні: вік, років; площа лісу в радіусі 3 км, %; питома площа лісу на 1 люд. у радіусі 3 км, км<sup>2</sup>/люд.; рівень забруднення території <sup>137</sup>Cs, кБк/м<sup>2</sup>; відстань до найближчого районного центра, км; відстань до найближчого лісового масиву, км; час від аварії на ЧАЕС до вимірювання внутрішньої дози, місяців; б) якісні: тип ґрунту; професія; зона забруднення.

Вихідні дані ШНМ зазнають обробки: значення категоріальних факторів кодується за допомогою OneHotEncoding у числові значення, що знаходяться в потрібному діапазоні; значення числових факторів нормалізуються за допомогою Z– score. У ході перехресної перевірки дані було розбито на 10 частин. У якості функції активації обрано функцію гіперболічного тангенса. За критерій зупинки навчання взято погіршення ефективності прогнозування на тестовому наборі даних. Обрахована модель містить мінімізовану похибку, що забезпечується методом зворотного поширення похибки. Сама похибка обраховується за формулами MSE, MAE.

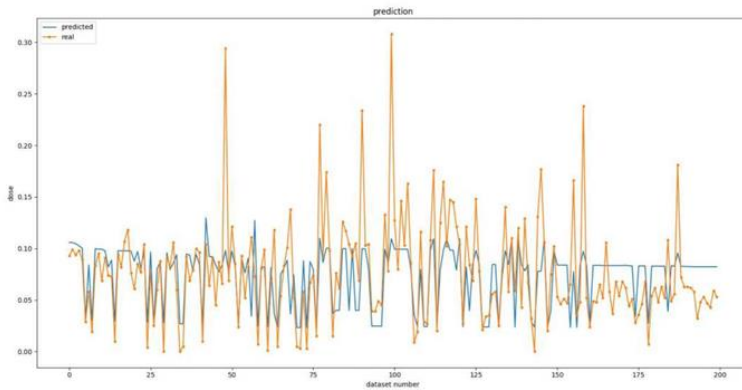
Таким чином, нами було розроблено математичне забезпечення формування дози внутрішнього опромінення населення внаслідок аварії на ЧАЕС. У результаті використання даного математичного забезпечення користувач отримує модель формування дози на основі статистичних даних. Розроблене математичне забезпечення, пристосоване до предметної області, надасть можливість зменшити затрати часу та фінансів, потрібних для вимірювання дози внутрішнього опромінення населення<sup>17</sup>.

Для створення математичної моделі формування дози внутрішнього опромінення населення внаслідок аварії на ЧАЕС за поточними даними та прогнозування результатів за даними, що будуть зібрані в майбутньому, було розроблено відповідне програмне забезпечення. Воно дозволяє користувачу обирати: провести навчання нейронної мережі та зберегти отримані ваги, або спрогнозувати значення дози внутрішнього опромінення з використанням уже існуючого файлу з вагами для ШНМ, а також виводити на екран відповідні графіки.

Програма розроблена з використанням мови програмування Python та оболонки PyQt. Python з його величезною кількістю бібліотек для обробки та аналізу даних, що є одним з найкращих інструментів для



роботи з файлами різних форматів та створення штучної нейронної мережі, а оболонка PyQt зв'язує його з Qt – інструментарієм для створення графічного інтерфейсу користувача. Реалізовану програмно систему навчено на вибірці з 2992 даних. У ході тестування було обчислено показники середньоквадратичної похибки ( $MSE = 0.0036$ ), середньої абсолютної похибки ( $MAE = 0.0346$ ), медіану абсолютної похибки ( $0.0197514$ ). Точність прогнозу на тестових наборах даних склала 89% (рис. 7). Було показано, що майже 2/3 даних мають значення абсолютної похибки, яке менше за середнє, що є добрим показником, адже такій моделі можна довіряти, а результати експериментів, проведених на такій моделі, будуть близькими до істиних.



**Рис. 7. Графік спрогнозованих доз внутрішнього опромінення у порівнянні зі справжніми значеннями для набору з 200 даних**

Програма має інтуїтивно зрозумілий та простий інтерфейс. Він дозволяє користувачу виставляти необхідні параметри нейронної мережі та обирати подальший хід роботи програми: навчання або прогнозування. Після чого користувач має можливість переглянути побудовані графіки для отриманої похибки після кожної епохи та візуально порівняти спрогнозовані значення з тими значеннями, які мали бути отримані. Також користувач має можливість вносити свої корективи до даних, що зберігаються, а саме редагувати їх та видаляти. З рис. 7 видно, що ШНМ краще навчилась прогнозувати дозу внутрішнього опромінення для старшого населення<sup>17</sup>.

Розроблене програмне забезпечення є унікальним для розглянутої предметної області. Висока точність прогнозу зумовлена тим, що система була адаптована для розв'язання задач саме такої специфіки.

## ВИСНОВКИ

З урахуванням результатів досліджень попередніх років та аналізу наявної бази дозиметричних даних, територіальних чинників впливу та тенденцій формування дози внутрішнього опромінення населення, було встановлено переважаючі тенденції формування дози внутрішнього опромінення мешканців Полісся України у віддалений період після аварії на ЧАЕС. Встановлено, що у віддалений період після аварії на ЧАЕС у сільських населених пунктах Українського Полісся простежуються ознаки експоненційного та нормального розподілів доз внутрішнього опромінення населення. Це свідчить про зміни закономірностей формування дозового навантаження на сільських мешканців, що можна пояснити соціально-демографічними, екологічними та економічними чинниками, притаманними кожному населеному пункту. Внаслідок неоднорідності впливу згаданих чинників відбувається диференціація населених пунктів за особливостями формування доз внутрішнього опромінення населення. Усе це дає підстави розглядати дозу внутрішнього опромінення як інтегральний соціально-економічний і радіоекологічний показник, що характеризує поточний ситуацію в регіоні, що постраждав внаслідок радіаційного забруднення.

Зважаючи на те, що певний набір дозоформуєчих прямих і непрямих чинників є властивістю певного населеного пункту, для досліджень було обрано показники: кількісні і якісні. За допомогою кластерного аналізу досліджувані поселення згруповано у 5 кластерів. Результати аналізу головних компонент показали, що найважливішими факторами, які впливають на формування дози внутрішнього опромінення, є щільність поверхневого забруднення та питома площа лісу на 1 особу. Однак рівні впливу факторів відрізняються для різних кластерів. Тому особливості формування дози внутрішнього опромінення вимагають детального аналізу не лише в розрізі населених пунктів, а й окремих родин.

На основі результатів досліджень розроблено математичну модель формування дози внутрішнього опромінення населення внаслідок аварії на ЧАЕС, застосування якої здатне зменшити затрати коштів та часу на проведення безпосередніх дозиметричних вимірювань. А для створення математичної моделі формування дози внутрішнього опромінення населення внаслідок аварії на ЧАЕС за поточними даними та прогнозування результатів за даними, що будуть зібрані в майбутньому, було розроблено відповідне програмне забезпечення, яке дозволяє користувачу обирати: провести навчання нейронної мережі та зберегти отримані ваги, або спрогнозувати значення дози внутрішнього опромінення з використанням уже існуючого файлу з вагами для штучної нейронної мережі, а також виводити на екран відповідні графіки. Програма розроблена з використанням мови програмування Python та оболонки PyQt. Python з його величезною кількістю бібліотек

для обробки та аналізу даних, що є одним з найкращих інструментів для роботи з файлами різних форматів та створення штучної нейронної мережі, а оболонка PyQt зв'язує його з Qt – інструментарієм для створення графічного інтерфейсу користувача.

## АНОТАЦІЯ

Проблема перевищення допустимого рівня доз внутрішнього опромінення актуальна переважно для сільського населення Українського Полісся. Новизною досліджень є оцінка закономірностей формування сучасної дози внутрішнього опромінення (за  $^{137}\text{Cs}$ ) сільського населення Українського Полісся. Встановлено, що у віддалений період після аварії на ЧАЕС у сільських населених пунктах Українського Полісся простежуються ознаки експоненційного розподілу доз внутрішнього опромінення населення. Це свідчить про зміни закономірностей формування дозового навантаження на сільських мешканців, що можна пояснити соціально-демографічними, екологічними та економічними чинниками, притаманними кожному населеному пункту. Внаслідок неоднорідності впливу згаданих чинників відбувається диференціація населених пунктів за особливостями формування доз внутрішнього опромінення населення.

Для створення математичної моделі формування дози внутрішнього опромінення населення внаслідок аварії на ЧАЕС за поточними даними та прогнозування результатів за даними, що будуть зібрані в майбутньому, було розроблено відповідне програмне забезпечення, яке дозволяє користувачу обирати: провести навчання нейронної мережі та зберегти отримані ваги, або спрогнозувати значення дози внутрішнього опромінення з використанням уже існуючого файлу з вагами для штучної нейронної мережі, а також виводити на екран відповідні графіки. Програма розроблена з використанням мови програмування Python та оболонки PyQt. Python з його величезною кількістю бібліотек для обробки та аналізу даних, що є одним з найкращих інструментів для роботи з файлами різних форматів та створення штучної нейронної мережі, а оболонка PyQt зв'язує його з Qt – інструментарієм для створення графічного інтерфейсу користувача.

## Література

1. Jacob P, Fesenko S, Firsakova S, Likhtarev I, Schotola C, Alexakhin R, Zhuchenko Y, Kovgan L, Sanzharova N, Ageyets V. Remediation strategies for rural territories contaminated by the Chernobyl accident. *J. of Environ. Radioactiv.* 2001;56(1-2):51–76. doi: 10.1016/S0265-931X(01)00047-9.
2. Labunska I, Kashparov V, Levchuk S, Santillo D, Johnston P, Polishchuk S, Lazarev N, Khomutinin Y. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chernobyl accident: Part 1. Human dietary exposure to Caesium-137 and possible mitigation measures.

Environment International. 2018;117: 250–59. doi: 10.1016/j.envint.2018.04.053.

3. Kachur DP, Zamostian PV, Pankovska HP, Raychuk LA, Kuchma MD, Sviatetska AV. Socio-ecological factors of consumer behavior of the population in radioactively contaminated Polissya territories. *Agroecological journal*. 2010; Special issue:106–109.

4. Thirty years after Chernobyl catastrophe: radiological and health effects: National report of Ukraine. Kyiv, SI “National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences”. 2016;177 p.

5. Omelianets MI, Khomenko IM. Evaluation of influence of radiological protection measures on internal irradiation levels in population of radioactively contaminated territories of Ukraine. *Hyg. of Sett*. 2013;61:237–43.

6. Ліхтарьов І.А., Ковган Л.М., Василенко В.В. та ін. (2012). Загальнодозиметрична паспортизація та результати ЛВЛ-моніторингу в населених пунктах України, які зазнали радіоактивного забруднення після Чорнобильської катастрофи. Дані за 2011 р. Збірка 14. Київ: (б. в.). 33 с.

7. Vasilenko V.V., Nechaev S.Y., Tsigankov M.Y. et al. Results Of Comprehensive Radiological & Hygienic Monitoring In Some Settlements Of Radiologically Contaminated Areas In Rivne Region In 2017. *Problems of Radiation Medicine and Radiobiology*. 2018. № 23. P. 139-152. <https://doi.org/10.33145/2304-8336-2018-23-139-152>

8. Чоботько Г.М., Райчук Л.А., Ландін В.П. Особливості та проноз внутрішнього опромінення сільського населення Українського Полісся у віддалений період після аварії на Чорнобильській АЕС (моніторингове дослідження). *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології. Problems of radiation medicine and radiobiology*. 2018. Вип. 23. С. 216–228.

9. Skryabin A, Hille R. Evaluation of the population dose in relation to social and geographical factors after the Chernobyl accident. *Julich, Forschungszentrum*. 1998; 75 p.

10. Vlasova N.G. Doses assessment of population at long-term period after the Chernobyl accident. *Radiation Hygiene*. 2014;7(3):9–18. (available online). <https://www.radhyg.ru/jour/article/view/37/54>.

11. Landin V., Chobotko G., Raichuk L., Shvydenko I., Umanskyi M., Kichigina O., Teteruk O. The formation of current internal exposure doses of the Ukrainian Polissia rural population. *Ukrainian Journal of Ecology*, 2020, 10(6), 249–254. Doi: 10.15421/2020\_290

12. Visenberg, Yu. V. and N. G. Vlasova. 2008. Rural settlements: social and ecological factors influencing on internal dose formation. *IRPA 12: 12 International Congress of the International Radiation Protection Association, Argentina: SAR*. 42(47): 42103486.

13. Vlasova, N. G. and V. V. Stavrov. 2005. Role of a family in formation of internal dose at inhabitants of rural society. *Med. Radiol. and Rad. Saf*. 50(5): 22-28.

14. Evaluation of the population dose in relation to social and geographical factors after the Chernobyl accident. 1997. The Cooperation Project № 07 GUS01/7 – Final report. Ulich, Germany.

15. Chobotko, G., V. Landin, L. Raichuk, I. Shvydenko, M. Umanskyi. 2015. Assessment of formation of the dose of internal irradiation of population at the remote stage of overcoming of aftereffects of Chernobyl disaster. *Agrovisnyk*. 7: 54–58.

16. Jelin BA, Sun W, Kravets A, Naboka M, Stepanova EuI, Vdovenko VY, Karmaus WJ, Lichosherstov A, Svendsen ER. Quantifying annual internal effective <sup>137</sup>Cesium dose utilizing direct body-burden measurement and ecological dose modeling. *J. of Expo. Sci. and Environ. Epidemiol.* 2016;26(6):546–53. doi: 10.1038/jes.2015.6.

17. Chobotko H., Raichuk L., Cherniavskiy A., Liubashenko N., McDonald I. Complex analysis and mathematical modeling of the internal exposure dose of the Ukrainian Polissya rural population. *Ядерна фізика та енергетика / NUCL. PHYS. AT. ENERGY*, 20 (2019), 397-404.

18. Nowlan S.J., Hinton G.E. Simplifying neural networks by soft weightsharing. *Neural Computation*, 4(4), 1992.

**Information about the authors:**

**Raichuk Liudmyla Anatoliivna,**

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher,  
Institute of Agroecology and Environmental Management of the National  
Academy of Agrarian Sciences of Ukraine  
12, Metrologichna Str., Kyiv, 03143, Ukraine

**Shvydenko Iryna Kostiantynivna,**

Candidate of Agricultural Sciences, Senior Researcher,  
Institute of Agroecology and Environmental Management of the National  
Academy of Agrarian Sciences of Ukraine  
12, Metrologichna Str., Kyiv, 03143, Ukraine

**Chobotko Hryhorii Mykhalovych,**

Doctor of Biological Sciences, Professor,  
Institute of Agroecology and Environmental Management of the National  
Academy of Agrarian Sciences of Ukraine  
12, Metrologichna Str., Kyiv, 03143, Ukraine