

**В. Г. Сінченко***ДП "Науковий центр превентивної токсикології, харчової та хімічної безпеки імені академіка Л.І. Медведя МОЗ України", м. Київ*

## **ДЕЯКІ МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ БЕТА-СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЗА РАДІАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ ПРОДУКЦІЇ АГРАРНОГО СЕКТОРУ ТА РИБНОГО ПРОМИСЛУ**

Розглянуто задачу визначення показника придатності (ПП) забрудненої радіонуклідами (РН) продукції аграрних та рибних господарств як показника безпеки від сумісної дії на організм людини РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ . Представлено новий підхід до розрахунку ПП. В ньому поєднано вміст зазначених РН у продукції та величину допустимих рівнів їх активності. Підхід базується на припущенні про залежність ПП від величин параметру кратності активності. Параметри визначено в одиницях мінімально вимірюваної питомої активності (МВПА) спектрометра для кожного з РН. Досліджено вплив на ПП коефіцієнтів запасу, як компенсатора похибок при розрахунку значень МВПА. Коефіцієнт запасу визначено як функцію параметра кратності.

Розрахунок значень коефіцієнта запасу проведено із застосування моделі опису розподілу відносної похибки вимірювання активності по параметру кратності. Використана при цьому нормована функція Гауса. Аргумент останньої представлено двома параметрами. Одним з них є параметр кратності активності, інший регулює ширину піку. Параметри функції Гауса визначаються за методом мінімізації квадратів відхилень. За таких їх значень експонента оптимально описує результат експерименту. Отримано універсальне рівняння для розрахунку ПП. Рівняння поєднує два окремих співвідношення, за якими ПП щодо сумісного впливу РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , зазвичай, розраховується при проведенні аналізу радіаційної якості продовольчої сировини та продуктів харчування.

Представлено результати розрахунків ПП, коефіцієнта запасу та необхідних для цього параметрів за даними вимірювання активності РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , у грибах лісового походження. Показано можливість попереднього оцінювання технологічних параметрів випробування. Обґрунтовано спосіб скорочення часу дослідження шляхом отримання даних за використання концентрованого і неконцентрованого зразків. Підтверджено ефективність алгоритму розрахунку ПП у випадку параметрів кратності, величина яких наближається до межі вимірювання. Представлені співвідношення надають додаткову гарантію у коректності рішення щодо придатності продукції.

**Ключові слова:** радіаційна безпека аграрних ресурсів та екосистем; продукція рибного промислу; нагляд за радіаційною якістю продовольчої сировини; спектрометрія радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$

**Окреслення проблеми, її актуальність.** Державна нормативно-правова база [3] обумовлює проведення постійного контролю за вмістом радіонуклідів (РН)  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продукції аграрних та рибних господарств. Її підґрунтям є наявна забрудненість зазначеними РН значних територій [8, 16] та ефект їх міграції у продукцію [17]. Практика робіт в даному напрямку показує необхідність скорочення термінів проведення контролю. При цьому його якість повинна бути прогнозовано високою. Один з можливих шляхів досягнення такого результату полягає у використанні комбінованих методів спектрометричного аналізу та проведення дослідження на неконцентрованих зразках продукції [14].

Рішення ряду науково-практичних задач, які стосуються життя населення на забруднених РН територіях [9], потребує інформації щодо вмісту  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продовольчій сировині та продуктах харчування. Кінцевою метою використання таких даних є однозначність в трактуванні результату співставлення вимірюваної активності РН з величиною їх допустимого рівня (ДР). Зазначені вимоги є суттєвими при вирішенні задач прогнозування дії випромінювання РН на організм людини, зокрема на територіях з низьким рівнем радіоактивного забруднення [1, 19]. Вони також актуалізуються у випадках досліджень дії на системи організму внутрішнього опромінювання  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  [4, 12] в комбінації з факторами забруднення довкілля, природа та механізм дії яких має інше походження. Вищенаведене обґрунтовує твердження, що удосконалення процедур визначення  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  та співставлення даних вимірювання з ДР їх активності у випадку аграрної і рибної продукції, може сприяти вирішенню значимої для практики загальної задачі – оцінювання і прогнозування якості продовольчих ресурсів.

**Попередні дослідження, їх аналіз.** Отримання інформації про вміст РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у сировині та продуктах харчування, мета якої є оцінювання радіаційної безпечності, в більшості випадків в останні 10 – 15 років проводиться згідно ряду методик виконання вимірювань (МВВ), в основу яких покладено спектрометричні методи. Апаратурна реалізація процесу визначення вмісту та контроль останнього щодо відповідності ДР зазначених РН для продукції аграрних і рибних господарств допускає використанням спектрометрів, як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Представлені в науковій літературі дані таких вимірювань, зокрема в [11-13, 18], в сукупності із даними, які отримані в тому числі і за методом радіохімічного аналізу [2, 4], дають підстави для наступного твердження: вироблена на більшості територій сільськогосподарських угідь та водойм продукція рослинництва, тваринництва та рибного промислу в тій або іншій мірі містить РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ . Вищі рівні активності спостерігаються у продовольчих ресурсах луків та лісу – ягодах і грибах [1, 6, 10]. Зазначене визначає вимоги до апаратури контролю та параметрів випробування. Так для ряду видів продукції досягнення необхідної точності визначення потребує концентрування первинного зразка. У випадку встановлення відсутності перевищення ДР вимірним значенням, наведені дані одночасно свідчать про можливість застосування в процесі контролю неконцентрованих зразків. Критерій співставлення вимірних значень з величиною ДР у випадку сировинної бази тваринництва будується на основі використання лише середніх значень величин активності [7]. Для випадку продовольчої сировини в критерій включено і параметри точності вимірювання активності [3]. Однак останній критерій використовує модель розрахунку показника придатності, в якій при зростанні величини активності і наближенні її до нижньої межі вимірювання не враховуються усереднення та статистичний характер процесів зростання сигналу детектора. Підхід вдосконалення моделі, в результаті чого беруться до уваги зазначені фактори, підвищує достовірність прийнятого рішення та висновку щодо результату випробування. Він обґрунтовує розширення можливостей здійсненні вимірювань поблизу границі чутливості. Один з варіантів удосконалення моделі розрахунку застосовано при вирішенні задачі оцінювання радіаційної якості поверхневих вод [15]. Там же представлено і основи визначення, алгоритм, співвідношення для розрахунку показників придатності та вибору технологічних параметрів випробування.

**Невирішені частини проблеми.** Недосконалість моделі опису процесу співставлення вимірних значень активності РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  з їх ДР у продовольчій сировині призводить до необхідності використання двох різних співвідношень для розрахунку показника придатності. Одне правомірно використовувати у випадку, коли наявна активність РН суттєво перевищує мінімальну визначальну питому активність (МВПА), а друге – коли вона менша за МВПА. За таких обставин не є можливим встановлення взаємозв'язку між граничними значеннями метрологічних характеристик спектрометра, технологічними параметрами проведення досліджень, оптимальними їх значеннями та ДР РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ . Окрім того, слід внести зміни і у співвідношення для обчислення показника придатності, в яких необхідно застосувати уточнені значення коефіцієнту корекції похибки визначення показника.

**Мета.** Робота присвячена встановленню величини показника радіаційної безпеки за наявності у продовольчій сировині РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ . Її метою є удосконалення моделі опису процесу співставлення визначеної активності зазначених РН та ДР їх наявності. Передбачено встановлення співвідношень, які описують функціональні зв'язки між характеристиками спектрометра та технологічними параметрами проведення дослідження. Робота зорієнтована на задачі встановлення показника безпеки у випадках низьких значень ДР наявності  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у продовольчій сировині та продуктах харчування.

**Завдання.** Заявлена мета передбачає встановлення аналітичного співвідношення критерію співставлення даних, яке має містити всі компоненти результату вимірювання. В процедурі оцінювання повинні знайти відображення характеристики спектрометра, параметри методик контролю та МВВ. Є необхідність в апробації отриманих результатів. Для цього передбачається встановлення результату співставлення і величини показника придатності на прикладі даних про активність  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у реальному зразку. Передбачена оцінка впливу параметрів випробування на рішення про придатність.

**Основний матеріал, результати, обговорення.** Аналітичні співвідношення для розрахунку значення показника придатності до споживання продукції аграрного сектору, рибних господарств, (далі продукція), встановимо на основі підходів теорії метрології та випробувань. Використаємо в якості критерію граничне значення довірчого інтервалу вимірюваної величини. В подальшому

належність величин до РН  $^{137}\text{Cs}$  позначимо індексом "Cs". По аналогії, індекс "Sr" відповідатиме належності до РН  $^{90}\text{Sr}$ . Значення ДР запишуться тоді як  $U_{Cs}$  та  $U_{Sr}$ . Також введемо в позначення величин індекс "i", який відповідатиме часу проведення вимірювання  $t_i$ . Позначимо через  ${}_i\bar{A}_{Cs}$  і  ${}_i\bar{A}_{Sr}$  середні значення питомої активності РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ , які визначаються спектрометром у лічильному зразку продукції. За наближенні обмеженого нормального закону розподілу вимірюваних значень активності  $^{137}\text{Cs}$  або  $^{90}\text{Sr}$  та ряду менш суттєвих припущень, співвідношення критерію безпечного сукупного впливу на організм людини зазначених РН у продукції, і одночасно в продуктах харчування, може бути представлено як:

$${}^{Cs}K_{Kon} \cdot \frac{{}_i\bar{A}_{Cs}}{U_{Cs}} + {}^{Sr}K_{Kon} \cdot \frac{{}_i\bar{A}_{Sr}}{U_{Sr}} + Z(P_K, P) \cdot K(P) \cdot [({}^{Cs}K_{Kon} \cdot \frac{{}_i\Delta A_{Cs}(P)}{U_{Cs}})^2 + ({}^{Sr}K_{Kon} \cdot \frac{{}_i\Delta A_{Sr}(P)}{U_{Sr}})^2]^{0,5} \leq 1,0. \quad (1)$$

У співвідношенні (1) через  ${}^{Cs}K_{Kon}$  і  ${}^{Sr}K_{Kon}$  позначено коефіцієнти концентрування продукції по масі, за яким підготовлено лічильний зразок. Величини  ${}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}_i\bar{A}_{Cs}$  та  ${}^{Sr}K_{Kon} \cdot {}_i\bar{A}_{Sr}$  відповідають середнім значенням вимірюваної питомої активності зазначених РН. Одночасно добутки  ${}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}_i\Delta A_{Cs}(P)$  та  ${}^{Sr}K_{Kon} \cdot {}_i\Delta A_{Sr}(P)$  представляють абсолютну похибку вимірювання відповідного середнього значення. Останні визначені за довірчої імовірності вимірювання  $P$ . Числове значення лівої частини нерівності (1) тотожно дорівнює показнику  $\Pi_{npd}$  придатності продукції до споживання. Також у (1) величина  $Z(P_K, P)$  – коефіцієнт корекції абсолютної похибки визначення величини активності, значення якої має бути встановленим. Цей коефіцієнт є функцією величини імовірності достовірності контролю  $P_K$  та імовірності  $P$ . Коефіцієнт  $K(P)$  враховує вплив на виміряне значення активності РН закону розподілу та співвідношення систематичної і випадкової складової похибок вимірювання активності РН.

Позначимо МВПА<sub>Cs</sub> через  ${}_i^m A_{Cs}$ , а МВПА<sub>Sr</sub> як  ${}_i^m A_{Sr}$ . Значення відповідають часу вимірювання  $t_i$ . Встановимо відношення МВПА до ДР. Позначимо їх через  ${}_i^m C = {}_i^m A_{Cs} / U_{Cs}$  та  ${}_i^m S = {}_i^m A_{Sr} / U_{Sr}$ . Як правило, у МВВ встановлено вимоги до технічних характеристик спектрометра та визначена похибка вимірювання. Зазначається і величина точності та відносної похибки у прив'язці до величини МВПА. Тому розглянемо два розрахункові параметри кратності активності, які поєднують в собі всі визначені програмним забезпеченням (ПЗ) спектрометра величини. Їх можна визначити наступним чином:

$${}_i\chi_{Cs} = {}_i\bar{A}_{Cs} / {}_i^m A_{Cs}, \quad {}_i\chi_{Sr} = {}_i\bar{A}_{Sr} / {}_i^m A_{Sr}; \quad {}_i\omega_{Cs} = {}_i\Delta A_{Cs}(P) / {}_i^m A_{Cs}, \quad {}_i\omega_{Sr} = {}_i\Delta A_{Sr}(P) / {}_i^m A_{Sr}. \quad (2)$$

За тривалого часу вимірювання, який на практиці становить величину більшу за 2400 с, найбільш інформативним є представлення залежності відносної похибки вимірювання активності для кожного із РН –  ${}_i\delta_{Cs} = {}_i\omega_{Cs} / {}_i\chi_{Cs}$  та  ${}_i\delta_{Sr} = {}_i\omega_{Sr} / {}_i\chi_{Sr}$ , як функції відповідних параметрів кратності –  ${}_i\chi_{Cs}$  і  ${}_i\chi_{Sr}$ . Дискретний ряд значень таких залежностей може бути встановлений за даними, які розраховані ПЗ спектрометра при варіації часу  $t_i$ . Для зразків з низьким рівнем активності є доцільним проведення апроксимації отриманих даних нормованою функцією Гауса. Встановлені згідно (2) параметри визначають активність та похибку її вимірювання в одиницях, які кратні МВПА. Показник  $\Pi_{npd}$  стає функцією, як  ${}_i\chi_{Cs}$ , так і  ${}_i\chi_{Sr}$ . Позначимо його через  $\Pi_{npd}({}_i\chi_{Cs}, {}_i\chi_{Sr})$ . Трансформуємо ліву частину співвідношення (1) з виділенням двох складових показника придатності. Перша – це середнє значення показника  $\bar{\Pi}_{npd}({}_i\chi_{Cs}, {}_i\chi_{Sr})$ , а друга –  $\Delta\Pi_{npd}({}_i\chi_{Cs}, {}_i\chi_{Sr})$  – похибка його визначення. Представимо їх як:

$$\bar{\Pi}_{npd}({}_i\chi_{Cs}, {}_i\chi_{Sr}) = {}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}_i\chi_{Cs} \cdot {}_i^m C + {}^{Sr}K_{Kon} \cdot {}_i\chi_{Sr} \cdot {}_i^m S. \quad (3)$$

$$\Delta\Pi_{npd}({}_i\chi_{Cs}, {}_i\chi_{Sr}) = K(P) \cdot [({}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}_i\chi_{Cs} \cdot {}_i^m C \cdot {}_i\delta_{Cs})^2 + ({}^{Sr}K_{Kon} \cdot {}_i\chi_{Sr} \cdot {}_i^m S \cdot {}_i\delta_{Sr})^2]^{0,5}. \quad (4)$$

У рівняннях (3) і (4) значення  ${}_i^m C$ ,  ${}_i^m S$ ,  ${}_i\chi_{Cs}$ ,  ${}_i\chi_{Sr}$  та  ${}_i\delta_{Cs}$  і  ${}_i\delta_{Sr}$  відповідають даним, які зафіксовані в час вимірювання  $t_i$ . За використання введених позначень складові частини критерію безпечного вмісту  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ , а саме показник придатності продукції, а також відносна похибка визначення останнього –  $\delta_{npd}({}_i\chi_{Cs}, {}_i\chi_{Sr})$ , будуть визначатись наступними співвідношеннями:

$$\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = \bar{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) + Z(P_K, P) \cdot \Delta\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) \leq 1,0. \quad (5)$$

$$\delta_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = \Delta\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) / \bar{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}). \quad (6)$$

Співвідношення (5) і (6) є загальними. Вони визначають умови радіаційної безпеки для будь-якої харчової продукції, в тому числі аграрних та рибних господарств. Відносні похибки  $i\delta_{Cs}$  і  $i\delta_{Sr}$  встановлюється по даним абсолютні похибки вимірювання  $i\Delta A_{Cs}(P)$  та  $i\Delta A_{Sr}(P)$  з нерівності (1). В її структуру часто вводиться і коефіцієнт  $K(P)$ , який, як зазначалося, виконує роль компенсатора впливу закону розподілу вимірюваних значень на похибку при зміні значення  $P$ . Запис критерію у вигляді (5) є відображенням навантаження на організм людини сукупного випромінювання РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$ .

В практиці бета-спектрометричних досліджень вмісту РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продукції рибної та аграрної галузей виробництва, а також у продуктах харчування, часто виникає ситуація, коли хоча би для одного, а то і обох РН, наявна активність менша за добуток – (коефіцієнт концентрування · МВПА). Остання, як правило, визначається за певних умов підготовки лічильного зразка при  $^{Cs}K_{Kon} = ^{Sr}K_{Kon} = 1,0$ . Припустимо рівність коефіцієнтів запасу  $^mZ$  для обох РН. Відносні похибки МВПА за довірчої імовірності  $P$  позначимо через  $_{MВПА}\delta_{Cs}$  та  $_{MВПА}\delta_{Sr}$ . Їх значення при розрахунку МВПА повинні бути приведені до величини не більшої за  $_{MВПА}\delta_{Cs} = _{MВПА}\delta_{Sr} = 0,40$ . У випадку коли виміряна активність РН є меншою за розраховане значення МВПА або за уточненим критерієм меншою за  $1,25 \cdot \text{МВПА}$  [13], рівняння (3) і (4) критерію придатності продукції до споживання трансформуються в наступні:

$$\bar{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = ^{Cs}K_{Kon} \cdot ^mZ \cdot ^m_i C + ^{Sr}K_{Kon} \cdot ^mZ \cdot ^m_i S. \quad (7)$$

$$\Delta\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = K(P) \cdot [ (^mZ \cdot ^{Cs}K_{Kon} \cdot ^m_i C \cdot 0,40)^2 + (^mZ \cdot ^{Sr}K_{Kon} \cdot ^m_i S \cdot 0,40)^2 ]^{0,5}. \quad (8)$$

З критерію придатності (5), його компонентів (7) і (8) випливає, що при проведенні порівняння вимірних значень активності з ДР на рішення щодо встановлення придатності суттєво впливають метрологічні характеристики спектрометра. У спектрометричних МВВ зазвичай подається інформація щодо мінімального та максимального значення похибки вимірювання. Як відомо, остання зростає при наближенні до нижньої межі вимірювання. За зростання похибки критерій (5) буде виконуватись лише при зменшенні величин добутоків  $^{Cs}K_{Kon} \cdot ^m_i A_{Cs}$  та  $^{Sr}K_{Kon} \cdot ^m_i A_{Sr}$ . Це підкреслює актуальність розгляду в застосуванні критерію придатності саме в діапазоні активності поблизу нижньої межі вимірювання.

В процесі встановлення показника придатності можливо використати серію з  $N$  даних, яка на одному лічильному зразку встановлюється послідовною реєстрацією величин, які визначаються ПЗ спектрометра в різний час  $t_i$ . В такому випадку представлення результатів у вигляді розрахункових параметрів згідно (2), дозволяє провести процедуру їх усереднення за методом мінімізації квадратів відхилень та визначити параметри функції апроксимації. Рівняння однієї з можливих апроксимуючих функції в ортогональних координатах  $(_H\tilde{\delta}(i\chi_{Cs}), i\chi_{Cs})$  на прикладі РН  $^{137}\text{Cs}$  представлено нижче:

$$_H\tilde{\delta}(i\chi_{Cs}) = _{он}\tilde{\delta}_{Cs} + (0,40 - _{он}\tilde{\delta}_{Cs}) \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \frac{(_i\chi_{Cs} - 1)^2}{_{он}\tilde{\sigma}_{Cs}^2} \right]. \quad (9)$$

У рівнянні (9) величини  $_{он}\tilde{\delta}_{Cs}$  та  $_{он}\tilde{\sigma}_{Cs}$  позначають параметри нормованої функції Гауса. Вони встановлюються в процесі її визначення. Рівняння (9) обумовлює перехід від коефіцієнту  $^mZ$  до залежного від  $i\chi_{Cs}$  коефіцієнту  $^mZ(i\chi_{Cs})$ . Встановлення аналітичного виразу останнього базується на припущенні, що розподіл коефіцієнту як функції  $i\chi_{Cs}$  є співвідносним до розподілу відносної похибки вимірювання активності РН  $^{137}\text{Cs}$  по цьому ж параметру. Значення коефіцієнту можна встановити, якщо виділити у ньому постійну та змінну складові. Враховуючи, що діапазон варіації коефіцієнта  $^mZ(i\chi_{Cs})$  становить  $(^mZ(i\chi_{Cs}) - 1,0)$ , раціонально поставити у відповідність останньому діапазон зміни відносної похибки, який становить  $(0,40 - _{ов}\tilde{\delta}_{Cs})$ . Тут  $_{ов}\tilde{\delta}_{Cs}$  є межею, до якої наближається похибка у випадку даних серії вимірювань, яка здійснена на лічильному зразку високої активності. Множник переходу  $\beta_{Cs}$  визначатиметься тоді за рівнянням  $\beta_{Cs} = 1/((0,40 - _{ов}\tilde{\delta}_{Cs}))$ .

Припустимо що в точці  ${}_i\chi_{Cs} = 1,0$  значення  ${}^mZ({}_i\chi_{Cs}) = 1,2$ . В такому випадку рівняння для розрахунку  ${}^mZ({}_i\chi_{Cs})$  буде наступним:

$${}^mZ({}_i\chi_{Cs}) = 1,0 + 0,2 \cdot \left\{ \frac{{}_{он}\tilde{\delta}_{Cs} - {}_{ов}\tilde{\delta}_{Cs}}{0,40 - {}_{ов}\tilde{\delta}_{Cs}} + \frac{0,40 - {}_{он}\tilde{\delta}_{Cs}}{0,40 - {}_{ов}\tilde{\delta}_{Cs}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot \frac{({}_i\chi_{Cs} - 1)^2}{{}_{он}\tilde{\sigma}_{Cs}^2} \right] \right\}. \quad (10)$$

Представлення (10) для коефіцієнта  ${}^mZ({}_i\chi_{Cs})$  вказує на відсутність поблизу точки  ${}_i\chi_{Cs} = 1,0$  різкого, ступеневого переходу його значень від величин 1,2 до 1,0. Такий ступеневий перехід, як зазначалось вище, з фізичних міркувань є некоректним. За необхідності зміни початкового значення  ${}^mZ(1,00) = 1,2$  множник 0,2 може бути замінений на визначену заздалегідь величину. Вона розраховується як  ${}^mZ({}_i\chi_{Cs}) - 1$ . При встановленні  ${}_{он}\tilde{\delta}_{Cs}$  слід розрізняти два випадки. Перший – коли виміряні середні значення активності  ${}_i\bar{A}_{Cs}$  є більшими за  $1,25 \cdot {}_i^m A_{Cs}$ , а другий – коли вони не перевищують або дорівнюють йому. Спосіб визначення значень  ${}_{он}\tilde{\delta}_{Cs}$  та  ${}_{он}\tilde{\sigma}_{Cs}$  для першого і другого випадків описано в [15]. Зазначені величини одночасно виступають і в якості параметрів варіації. За подібною процедурою можна встановлювати і величину  ${}_{ов}\tilde{\delta}_{Cs}$ , яку доцільно визначити невдовзі після метрологічної атестації спектрометра проводячи вимірювання референтного зразка з високим рівнем активності. Подібні (9) і (10) співвідношення, в яких індекс "Cs" буде замінено індексом "Sr", застосовуються для випадку РН  ${}^{90}\text{Sr}$ . Слід акцентувати увагу на тому, що пари встановленні за аналогічним алгоритмом величини  ${}_{ов}\tilde{\delta}_{Sr}$ ,  ${}_{он}\tilde{\delta}_{Sr}$  і  ${}_{он}\tilde{\sigma}_{Sr}$ , а також функції  ${}_H\tilde{\delta}({}_i\chi_{Sr})$  та коефіцієнту  ${}^mZ({}_i\chi_{Sr})$  використовуються інші, відмінні від  ${}_i\chi_{Cs}$  значення, а саме  ${}_i\chi_{Sr}$ .

Структура співвідношень показника придатності (5) за використання рівнянь (3), (4) та (7) і (8) є подібною за двох умов. Перша – це припущення, що в (3) і (4) коефіцієнт  ${}^mZ = 1,0$ . Друга умова стосується значення відносної похибки в момент вимірювання, який фіксується часом  $t_i$ . Розглянемо ситуацію, коли відносні похибки у (4) описуються функціями, значення яких при величині параметрів кратності  ${}_i\chi_{Cs} > 1,25$  та  ${}_i\chi_{Sr} > 1,25$  для часу  $t_i$  співпадатимуть із значення  ${}_i\tilde{\delta}_{Cs}$  та  ${}_i\tilde{\delta}_{Sr}$ . Окрім того, одночасно, за наближення параметрів  ${}_i\chi_{Cs}$  і  ${}_i\chi_{Sr}$  до 1,0 зазначені функції добігатимуть до величин  ${}_i\tilde{\delta}_{Cs} = {}_i\tilde{\delta}_{Sr} = 0,40$ . Найпростішими функціями такого типу, зокрема, можуть вважатись функції пучка прямих, які проходять через точку із координатами  $({}_i\tilde{\delta}_{Cs} = 0,40, {}_i\chi_{Cs} = 1,0)$  для РН  ${}^{137}\text{Cs}$  та відповідно для РН  ${}^{90}\text{Sr}$  –  $({}_i\tilde{\delta}_{Sr} = 0,40, {}_i\chi_{Sr} = 1,0)$ . Аналітичний запис функцій пучка прямих є наступним:

$${}_i\tilde{\delta}_{Cs} = \frac{{}_i\tilde{\omega}_{Cs} - 0,40}{{}_i\chi_{Cs} - 1} - \frac{{}_i\tilde{\omega}_{Cs} - 0,40 \cdot {}_i\chi_{Cs}}{({}_i\chi_{Cs} - 1) \cdot {}_i\chi_{Cs}}; \quad {}_i\tilde{\delta}_{Sr} = \frac{{}_i\tilde{\omega}_{Sr} - 0,40}{{}_i\chi_{Sr} - 1} - \frac{{}_i\tilde{\omega}_{Sr} - 0,40 \cdot {}_i\chi_{Sr}}{({}_i\chi_{Sr} - 1) \cdot {}_i\chi_{Sr}}. \quad (11)$$

У рівняннях (11)  ${}_i\tilde{\omega}_{Cs}$  та  ${}_i\tilde{\omega}_{Sr}$  – нові значення параметрів  ${}_i\omega_{Cs}$  і  ${}_i\omega_{Sr}$ . Останні встановлені раніше згідно рівняння (2). З урахуванням визначення величин  ${}_H\tilde{\delta}({}_i\chi_{Cs})$  і  ${}_H\tilde{\delta}({}_i\chi_{Sr})$  за даними  $N$  вимірювань та наступною їх апроксимацією, розрахункові значення  ${}_i\tilde{\omega}_{Cs}$  та  ${}_i\tilde{\omega}_{Sr}$  встановлюються згідно рівнянь:

$${}_i\tilde{\omega}_{Cs} = {}_H\tilde{\delta}({}_i\chi_{Cs}) \cdot {}_i\chi_{Cs}, \quad {}_i\tilde{\omega}_{Sr} = {}_H\tilde{\delta}({}_i\chi_{Sr}) \cdot {}_i\chi_{Sr}. \quad (12)$$

Застосування рівняння (11) у співвідношеннях (4) і (8) та величини  ${}^mZ({}_i\chi_{Cs})$  додатково у (3) і (7) показує, що два розглянутих варіанти розрахунку показника придатності можуть бути приведені до одного. Встановлене в такий спосіб аналітичне співвідношення забезпечить з високим ступенем наближення тотожність визначення величини показника придатності при значеннях параметру кратності  ${}_i\chi_{Cs} = {}_i\chi_{Sr} \leq 1,0$ , а також при  ${}_i\chi_{Cs} = {}_i\chi_{Sr} \gg 1,0$ . Виходячи з представлених результатів, розраховавши попередньо значення коефіцієнтів  ${}^mZ({}_i\chi_{Cs})$  та  ${}^mZ({}_i\chi_{Sr})$ , можна записати вирази для компонентів узагальненого показника придатності за різних значень  ${}_i\chi_{Cs}$  та  ${}_i\chi_{Sr}$  у вигляді рівнянь:

$$\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = {}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}^mZ(i\chi_{Cs}) \cdot i\chi_{Cs} \cdot {}^mC + {}^{Sr}K_{Kon} \cdot {}^mZ(i\chi_{Sr}) \cdot i\chi_{Sr} \cdot {}^mS \quad (13)$$

$$\Delta \tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = K(P) \cdot \left\{ [{}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}^mZ(i\chi_{Cs}) \cdot i\chi_{Cs} \cdot {}^mC \cdot (\frac{\tilde{\omega}_{Xx} - 0,40}{i\chi_{Xx} - 1} - \frac{\tilde{\omega}_{Xx} - 0,40 \cdot i\chi_{Xx}}{(i\chi_{Xx} - 1) \cdot i\chi_{Xx}})]^2 + \right. \\ \left. [{}^{Sr}K_{Kon} \cdot {}^mZ(i\chi_{Sr}) \cdot i\chi_{Sr} \cdot {}^mS \cdot (\frac{\tilde{\omega}_{Xx} - 0,40}{i\chi_{Xx} - 1} - \frac{\tilde{\omega}_{Xx} - 0,40 \cdot i\chi_{Xx}}{(i\chi_{Xx} - 1) \cdot i\chi_{Xx}})]^2 \right\}^{0,5}. \quad (14)$$

Критерій (5) в поєднанні з рівняннями (13) і (14) є універсальним. Він поєднує випадки, які стосуються знаходження величини  $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$  згідно рівнянь (3), (4) та (7) і (8). Вихідними для розрахунків служать встановлені нормативно-правовою базою та в результаті вимірювань параметри  $i\chi_{Cs}$ ,  $i\omega_{Cs}$ ,  ${}^m A_{Cs}$ ,  $U_{Cs}$  та  $i\chi_{Sr}$ ,  $i\omega_{Sr}$ ,  ${}^m A_{Sr}$ ,  $U_{Sr}$ . В такій же якості виступають і попередньо визначені величини  $\tilde{\delta}_{Cs}$ ,  $\tilde{\omega}_{Cs}$ ,  $\tilde{\sigma}_{Cs}$  та  $\tilde{\delta}_{Sr}$ ,  $\tilde{\omega}_{Sr}$ ,  $\tilde{\sigma}_{Sr}$ . Інформація про них є необхідною для розрахунку коефіцієнтів  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$ ,  ${}^mZ(i\chi_{Sr})$  в точках різних  $i\chi_{Cs}$ ,  $i\chi_{Sr}$  та інших величини з рівнянь (8) та мінімізації відхилень. Технологічними параметрами служать маса зразка, час  $t_i$ , число вимірювань  $N$ , а також значення коефіцієнтів  ${}^{Cs}K_{Kon}$ ,  ${}^{Sr}K_{Kon}$ . В процесі випробування ці величини можуть змінюватись.

Рівняння (13), (14) застосовані при встановленні величин показників  $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$  у випадку продукції лісового походження "Гриби охолоджені, моховики". Контроль вмісту РН  ${}^{137}\text{Cs}$  та  ${}^{90}\text{Sr}$  у такій продукції є актуальним через значну їх міграцію з ґрунту в кореневу систему гриба, а також ефект акумуляції. Дослідження проводилось з використанням спектрометра СЕБ 01–150. Високі значення ДР для даної продукції ( $U_{Cs} = 500$  Бк/кг і  $U_{Sr} = 50$  Бк/кг) створюють передумови для визначення зазначеного показника без проведення процедури концентрування. Однак через пористу структуру і, як наслідок малу питому вагу зразків грибів, виникає необхідність застосування геометрії вимірювання, яка відповідає масі лічильного зразка  $m_{zp} = 96$  г або меншій. Використання такого зразка передбачає суттєво більші величини МВПА<sub>Cs</sub> та МВПА<sub>Sr</sub>. За цих обставин можна вважати доцільним проведення попереднього оцінювання величини технологічних параметрів випробування, зокрема часу  $t_i$ .

Проведене дослідження засвідчило наявність у зразку продукції "Гриби охолоджені, моховики" РН  ${}^{137}\text{Cs}$ . Воно показало і на можливу низьку (меншу за МВПА<sub>Sr</sub>) наявність РН  ${}^{90}\text{Sr}$ . Для прийняття рішення щодо придатності даного продукту до споживання було проведено обрахунок даних випробування згідно представлених вище співвідношень. Результати для різного часу  $t_i$  наведено в табл. 1. Там же подано дані про первинні та вторинні параметри випробування, а також значення показника  $\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$ , які отримані шляхом традиційної обробки результатів вимірювання.

Величина різниці  $\tilde{\delta}_{Cs} - \tilde{\omega}_{Cs} = 0,0204$  свідчить про незначну наявність у досліджуваних грибах "сторонніх" РН природного походження. Це обумовлює наведені в табл. 1 величини коефіцієнту  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$ , яка із зростанням параметру кратності  $i\chi_{Sr}$  наближається до 1,019739. Спостерігається і зміна в показниках  $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$  і  $\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$ . Від значень 1,4396 і 1,4298 вони із збільшенням часу  $t_i$  зменшуються до величини, відповідно 0,8720 та 0,8668, що відповідає умові придатності до споживання досліджуваного зразка продукції. Такий перехід величини показників від більших за 1,0 значень до менших за неї є наслідком зменшення величини МВПА<sub>Cs</sub> та МВПА<sub>Sr</sub> із зростанням часу  $t_i$ . Це підтверджує припущення про важливість та необхідність проведення попереднього оцінювання величин технологічних параметрів випробування, зокрема необхідного часу вимірювання.

Апроксимація виміряних значень похибки вимірювання активності нормованою функцією Гауса згідно запропонованої моделі в процесі визначення показника придатності призводить до зростання його величини. Значення  $i\chi_{Cs}$  та  $i\chi_{Sr}$  у показнику  $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs} = \dots, i\chi_{Sr} = \dots) = \dots$  надають інформацію щодо співвідношення між рівнем активності  ${}^{137}\text{Cs}$  та  ${}^{90}\text{Sr}$  у продукції та МВПА спектрометра для цих РН. Підхід, співвідношення обрахунку, форма представлення показника направлені на вдосконалення процедури трактування даних вимірювання, а також

результату випробування. Наведені в табл. 1 підвищені значення показника  $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$  доцільно трактувати як додаткову гарантію коректності висновку про безпечність наявного вмісту РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продукції "Гриби охолоджені, моховики".

Таблиця 1

**Значення у відносних одиницях для зразка "Гриби охолоджені, маслюки" первинних і вторинних розрахункових параметрів, коефіцієнтів  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$ ,  ${}^{Cs}K_{Kon}$ ,  ${}^{Sr}K_{Kon}$  та показників**

**$\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$  і  $\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$  при різних  $i\chi_{Cs}$  та  $i\omega_{Cs}$**

| Вихідні та вторинні параметри                                                                                                                                                                                                                                                                  |              |                |                |              |                |                                    | Коефіцієнти і показники |                                             |                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------|
| ${}_{ov}\tilde{\delta}_{Cs} = 0,1933$ ; ${}_{on}\tilde{\delta}_{Cs} = 0,2137$ ; ${}_{on}\tilde{\delta}_{Cs} = 0,4932$ ; ${}^{Cs}K_{Kon} = {}^{Sr}K_{Kon} = 1,0$ ;<br>$N = 6$ ; $[{}^m_iA_{Cs}] = [{}^m_iA_{Sr}] = [\text{Бк.кг}]$ ; $U_{Cs} = 500 \text{ Бк/кг}$ ; $U_{Sr} = 50 \text{ Бк/кг}$ |              |                |                |              |                |                                    | ${}^mZ(i\chi_{Cs})$     | $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$ | $\Pi_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$ |
| $t_i, \text{с}$                                                                                                                                                                                                                                                                                | $i\chi_{Cs}$ | $i\omega_{Cs}$ | ${}^m_iA_{Cs}$ | $i\chi_{Sr}$ | ${}^m_iA_{Sr}$ | ${}_{i}\tilde{\delta}(i\chi_{Cs})$ |                         |                                             |                                     |
| 2400                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2,06272      | 0,47626        | 59,63          | 1,0001       | 32,00          | 0,23198                            | 1,037428                | 1,43961                                     | 1,42981                             |
| 3600                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2,48705      | 0,54715        | 48,25          | 1,0001       | 26,13          | 0,21568                            | 1,021652                | 1,21353                                     | 1,20831                             |
| 4800                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2,84337      | 0,61686        | 41,50          | 1,0001       | 22,63          | 0,21387                            | 1,019906                | 1,08098                                     | 1,07620                             |
| 6000                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3,12416      | 0,66791        | 37,13          | 1,0001       | 20,13          | 0,21372                            | 1,019756                | 0,98558                                     | 0,98067                             |
| 7200                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3,37777      | 0,70815        | 33,75          | 1,0001       | 18,38          | 0,21370                            | 1,019740                | 0,91761                                     | 0,91244                             |
| 8400                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 3,72631      | 0,78703        | 31,13          | 1,0001       | 17,00          | 0,21370                            | 1,019739                | 0,87198                                     | 0,86680                             |

Представлений алгоритм знаходження складових критерію (5) в сукупності з розрахунковими величинами, рівнянь (13) і (14) забезпечує можливість оцінювання діапазону концентрування досліджуваної продукції сільського і рибного господарства, а також морепродуктів при комбінованому використанні при випробуванні концентрованих та неконцентрованих лічильних зразків. Детальний розгляд такого способу визначення показника придатності видається важливою в практичній діяльності задачею. Її вирішення дозволяє окреслити можливості для суттєвого скорочення часу випробування.

Розглянемо випадок послідовного вимірювання активності, коли активність РН  $^{90}\text{Sr}$  вимірюється бета-спектрометром з використанням неконцентрованого зразка. За таких умов значення коефіцієнтів становлять  ${}^{Sr}K_{Kon} = 1,0$ ,  ${}^mZ(i\chi_{Sr}) = 1,20$ , а розрахункових параметрів і вимірюваних величин –  $i\chi_{Sr} = 1,0001$  аі  ${}_{i}\tilde{\delta}_{Sr} = 0,40$ . Критерій (5), як показник придатності продукції  $\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr})$ , за усередненими даними вимірювань з урахуванням величин з рівнянь (11), (13), (14) прийме тоді наступний вигляд:

$$\tilde{\Pi}_{npd}(i\chi_{Cs}, i\chi_{Sr}) = {}^mZ(i\chi_{Cs}) \cdot {}^{Cs}K_{Kon} \cdot i\chi_{Sr} \cdot {}^m_iC + 1,20 \cdot {}^m_iS + Z(P_K, P) \cdot K(P) \cdot \{[{}^mZ(i\chi_{Cs}) \cdot {}^{Cs}K_{Kon} \cdot i\chi_{Sr} \cdot {}^m_iC \cdot {}_{i}\tilde{\delta}_{Cs}]^2 + [1,20 \cdot {}^m_iS \cdot (0,40)]^2\}^{0,5} \leq 1,0. \quad (15)$$

Співвідношення (15) у випадку рівності за відомих технологічних параметрів проведення випробування забезпечує можливість визначення максимального значення активності РН  $^{137}\text{Cs}$ , яке при заданих значеннях  $U_{Cs}$  і  $U_{Sr}$  та відомому коефіцієнті  ${}^{Cs}K_{Kon}$  може бути виміряне та відповідати умові придатності. Зворотна задача, яка також може бути вирішена – це за відомого значення активності знаходження величини необхідного коефіцієнту  ${}^{Cs}K_{Kon}$ , за якого буде виконуватись (15). Розглянемо такі випадки детальніше. Для спрощення запису в подальшому введемо позначення:

$$Q({}^{Cs}K_{Kon} \cdot i\chi_{Cs}) = {}^{Cs}K_{Kon} \cdot {}^mZ(i\chi_{Cs}) \cdot i\chi_{Cs} \cdot {}^m_iC. \quad (16)$$

Замінімо в (15) відповідні множники на  $Q({}^{Cs}K_{Kon} \cdot i\chi_{Cs})$ . Для випадку рівності 1,0 доданків лівої частини (15) отримаємо алгебраїчне рівняння, яке має аналітичний розв'язок по відношенню до величини  $Q({}^{Cs}K_{Kon} \cdot i\chi_{Cs})$ . В ньому величини  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$ ,  ${}^m_iS$  та  ${}_{i}\tilde{\delta}_{Cs}$  можуть виступати в якості параметрів варіації. Розглянемо випадок, коли результат випробування повинен бути забезпечений з імовірністю контролю  $P_K = 0,95$ . Для випадку використання бета-спектрометра, в якому у ПЗ для визначення питомої активності використано величина  $P = 0,95$ , значення коефіцієнтів є наступними:  $Z(P_K, P) = 1,21$ ,  $K(P) = 1,10$ . За таких умов отримаємо рішення рівняння у вигляді наступної рівності:

$$Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}) = \frac{(1-1,2 \cdot {}^mS) - \sqrt{(1-1,2 \cdot {}^mS)^2 - [1 - (1,331 \cdot \tilde{\delta}_{Cs})^2] \cdot [(1-1,2 \cdot {}^mS)^2 - (0,63888 \cdot {}^mS)^2]}}{1 - (1,331 \cdot \tilde{\delta}_{Cs})^2} \quad (17)$$

У останньому співвідношенні (17) значення кореню квадратного використано із знаком (-). Протилежний знак (+) приводить до збільшення величини  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$  і, як наслідок, до невиконання нерівності (5). Рішення (17) віддзеркалює функціональну залежність між  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$  та величинами  ${}^mS$  і  $\tilde{\delta}_{Cs}$ , які стосуються відповідно РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ . Значення  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$  може бути знайдене при різних зазначених величинах, діапазон варіації яких пов'язаний з МВПА спектрометра та часом  $t_i$ .

Здійснення контролю за вмістом  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  у продукції рибних господарств та морепродуктах можна розглядати як складову частину заходів, метою яких є покращення конкурентноздатності продукції на ринках споживання [5]. З цієї причини в таблиці 2 представлено результати розрахунків, які стосуються досліджень рибної продукції. При цьому використано дані про характеристики бета-спектрометра СЕБ 01–150. Через наближену до  $1,0 \text{ г/см}^3$  питому вагу продукції масу лічильного зразка вибрано як  $0,16 \text{ кг}$ . Дані відповідають часу  $t_i = 7200 \text{ с}$  та  $t_i = 14400 \text{ с}$ . Величина МВПА для таких  $t_i$  в одиницях Бк/кг є наступною: при  $t_i = 7200 \text{ с}$   $\text{МВПА}_{Cs} = 20,88$ ,  $\text{МВПА}_{Sr} = 17,75$ , а при  $t_i = 14400 \text{ с}$  – відповідно  $14,76$  та  $12,55$ . Значення коефіцієнту  ${}^mZ(i \chi_{Cs})$  встановлювалось по величині  $\tilde{\delta}_{Cs}$  згідно рівняння (10) за припущення, що час  $t_i$  є тривалим. За такої ситуації величину експоненти в (10) можна вважати наближеною до нуля. В розрахунках використано усереднене значення  $\tilde{\delta}_{Cs} = 0,20$ . Величина  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$ , оціночний параметр  ${}^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  та похибка  $\delta_{npd}(i \chi_{Cs}, i \chi_{Sr})$  встановлювались відповідно рівнянням (17), (16) і (6). Як параметри варіації використано величини  ${}^mZ(i \chi_{Cs})$ ,  ${}^mA_{Cs}$ ,  ${}^mA_{Sr}$  і  $\tilde{\delta}_{Cs}$ .

Таблиця 2

**Значення параметрів  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$ ,  ${}^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$ ,  $\delta_{npd}(i \chi_{Cs}, i \chi_{Sr})$  для випадку випробування продукції рибних господарств за різних МВПА<sub>Cs</sub> і МВПА<sub>Sr</sub> при варіації величини похибки  $\tilde{\delta}_{Cs}$ .**

| $[U_{Cs}]$<br>( $U_{Sr}$ ) | $[{}^m A_{Cs}]$<br>( ${}^m A_{Sr}$ ) | Розрахункові<br>величини                 | $\tilde{\delta}(i \chi_{Cs}) = 0,25$<br>${}^mZ(i \chi_{Cs}) = 1,05$ | $\tilde{\delta}(i \chi_{Cs}) = 0,30$<br>${}^mZ(i \chi_{Cs}) = 1,10$ | $\tilde{\delta}(i \chi_{Cs}) = 0,35$<br>${}^mZ(i \chi_{Cs}) = 1,15$ | $\tilde{\delta}(i \chi_{Cs}) = 0,38$<br>${}^mZ(i \chi_{Cs}) = 1,18$ |
|----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $[150]$<br>(35)            | $[20,88]$<br>(17,75)                 | $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$      | 0,066667                                                            | 0,066344                                                            | 0,065971                                                            | 0,065724                                                            |
|                            |                                      | ${}^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$       | 0,456123                                                            | 0,433281                                                            | 0,412113                                                            | 0,400131                                                            |
|                            |                                      | $\delta_{npd}(i \chi_{Cs}, i \chi_{Sr})$ | 0,397487                                                            | 0,398072                                                            | 0,398749                                                            | 0,399820                                                            |
|                            | $[14,76]$<br>(12,55)                 | $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$      | 0,317449                                                            | 0,309434                                                            | 0,301099                                                            | 0,296038                                                            |
|                            |                                      | ${}^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$       | 3,072483                                                            | 2,858777                                                            | 2,660825                                                            | 2,549590                                                            |
|                            |                                      | $\delta_{npd}(i \chi_{Cs}, i \chi_{Sr})$ | 0,278820                                                            | 0,290786                                                            | 0,303529                                                            | 0,311270                                                            |

Результати табл. 2 ілюструють зменшення можливих максимальних значень вимірюваної питомої активності РН  $^{137}\text{Cs}$  при збільшенні відносної похибки вимірювання. Розширення діапазону вимірювання таких значень буде спостерігатись із зменшенням величин МВПА<sub>Cs</sub> та МВПА<sub>Sr</sub>. Дані табл. 2 показують, що у випадку вимірювання вмісту  $^{90}\text{Sr}$  на протязі 7200 с для визначення вмісту РН  $^{137}\text{Cs}$  необхідно проводити повторне вимірювання. При цьому необхідне використання лічильного зразка, який підготовлений за процедурою концентрування. Коефіцієнт концентрування не має перевищувати величину  $\approx 0,40$ . При збільшенні часу вимірювання вдвічі, до 14400 с, стає можливим визначення вмісту обох РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  за використання одного неконцентрованого лічильного зразка продукції. У випадку, коли активність РН  $^{90}\text{Sr}$  є меншою за 12,55 Бк/кг, наявна активність РН  $^{137}\text{Cs}$  в ідеальному випадку до 37,63 Бк/кг ще буде відповідати критерію придатності продукції до споживання.

Оцінимо параметри випробування у випадку продукції рослинництва аграрного сектору. Нормативне значення ДР в порівнянні з продукцією рибних господарств є суттєво меншими. Тому можна очікувати, що в процесі випробування стане необхідним використання етапу

концентрування. Використання концентрованого лічильного зразка обумовлює ще одну можливу відмінність від попереднього випадку. Суть її в тому, що за спрощеної процедури концентрування шляхом озолення, лічильний зразок має меншу густину. Його вимірювання можливе лише за збільшених величин МВПА<sub>Cs</sub>. Тому в розрахунках використовується значення МВПА<sub>Cs</sub>, які наближено відповідають густині золи у лічильному зразку 0,6 г/см<sup>3</sup>. При цьому очікувано зменшуються значення  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$ .

В таблиці 3 представлені результати розрахунку оціночного параметра  $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  при варіації параметрів, тотожних попередньо наведеному прикладу. Увагу зосереджено на випадках незначних величин МВПА<sub>Cs</sub> та МВПА<sub>Sr</sub>. Досягнення таких величин в процесі випробування можливе за рахунок збільшення часу  $t_i$ . Значок "@" позначає випадки, в яких параметр  $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  не є визначеним через від'ємне значення величини  $Q(^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs})$ . Останнє спостерігається, якщо у (17) значення кореню квадратного перевищує величину  $(1 - 1,2 \cdot {}^m_i S)$ , що з метрологічної точки зору видається некоректним.

Таблиця 3.

**Значення оціночного параметра  $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  для деяких окремих видів продукції рослинництва та овочівництва за різних  ${}^m_i A_{Cs}$  і  ${}^m_i A_{Sr}$  при різних ДР  $U_{Cs}$  і  $U_{Sr}$  та варіації похибки  ${}_i \tilde{\delta}_{Cs}$ .**

| $[U_{Cs}]$<br>( $U_{Sr}$ ) | ${}_i \tilde{\delta}(\chi_{Cs})$ | $mZ(i \chi_{Cs})$ | ${}^m_i A_{Cs} = 23,86$<br>${}^m_i A_{Sr} = 12,55$ | ${}^m_i A_{Cs} = 20,67$<br>${}^m_i A_{Sr} = 10,87$ | ${}^m_i A_{Cs} = 19,49$<br>${}^m_i A_{Sr} = 10,25$ | ${}^m_i A_{Cs} = 18,48$<br>${}^m_i A_{Sr} = 9,72$ |
|----------------------------|----------------------------------|-------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
|                            |                                  |                   | $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$                   |                                                    |                                                    |                                                   |
| [ 50 ]<br>( 30 )           | 0,25                             | 1,05              | 0,440704                                           | 0,621798                                           | 0,839473                                           | 0,954195                                          |
|                            | 0,30                             | 1,10              | 0,413465                                           | 0,578840                                           | 0,779383                                           | 0,883847                                          |
|                            | 0,35                             | 1,15              | 0,387993                                           | 0,539017                                           | 0,723863                                           | 0,819250                                          |
|                            | 0,38                             | 1,18              | 0,373542                                           | 0,516624                                           | 0,692798                                           | 0,783208                                          |
| [ 50 ]<br>( 20 )           | 0,25                             | 1,05              | @                                                  | 0,001310                                           | 0,139326                                           | 0,268934                                          |
|                            | 0,30                             | 1,10              | @                                                  | 0,001251                                           | 0,132445                                           | 0,254730                                          |
|                            | 0,35                             | 1,15              | @                                                  | 0,001196                                           | 0,126078                                           | 0,241492                                          |
|                            | 0,38                             | 1,18              | @                                                  | 0,001166                                           | 0,122480                                           | 0,233977                                          |
| [ 40 ]<br>( 20 )           | 0,25                             | 1,05              | @                                                  | 0,001048                                           | 0,111461                                           | 0,215147                                          |
|                            | 0,30                             | 1,10              | @                                                  | 0,001001                                           | 0,105956                                           | 0,203784                                          |
|                            | 0,35                             | 1,15              | @                                                  | 0,000957                                           | 0,100863                                           | 0,193194                                          |
|                            | 0,38                             | 1,18              | @                                                  | 0,000933                                           | 0,097984                                           | 0,187182                                          |

Результати табл. 2 свідчать про зростання оціночного параметра  $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  із зменшенням величин  ${}^m_i A_{Cs}$ ,  ${}^m_i A_{Sr}$  при всіх значеннях  ${}_i \tilde{\delta}(\chi_{Cs})$ . Однак встановлені величини  $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  є меншими за 1,0. З цього випливає, що у випадку продукції рослинництва і овочівництва здійснення контролю за вмістом РН  $^{137}\text{Cs}$  не може бути проведено без використання концентрованого лічильного зразка. Дані про параметр  $^{Cs}K_{Kon} \cdot i \chi_{Cs}$  показують і величину мінімально необхідного значення коефіцієнту  $^{Cs}K_{Kon}$ , за якого ще буде виконуватись критерій придатності. Зазначимо, що у випадку аграрної продукції проведення озолення проби до чорної золи термічним методом забезпечує досягнення з мінімальними витратами значень  $^{Cs}K_{Kon}$ , які є меншими за 0,07. За таких  $^{Cs}K_{Kon}$  при МВПА<sub>Cs</sub>, наприклад, 19,49 Бк/кг та при  $U_{Cs} = 50$  Бк/кг отримаємо величину допустимої активності РН  $^{137}\text{Cs}$  у 34,10 Бк/кг. За меншої активності  $^{137}\text{Cs}$  продукція буде вважатись придатною до споживання. Перехід до менших значень ДР РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  в процесі контролю очікувано потребуватиме зменшення величин МВПА<sub>Cs</sub> та МВПА<sub>Sr</sub>.

Запропонований варіант випробування з використанням двох лічильних зразків та співставлення наявного вмісту РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  з величиною ДР у продукції аграрного сектору є концептуальним. Його основна перевага – суттєве скорочення загального часу випробування. Процес отримання позитивного рішення щодо придатності на одному неконцентрованому лічильному зразку є неможливим через метрологічні обмеження спектрометра та низькі значення ДР. Використання одного концентрованого лічильного зразка для встановлення активності

зазначених РН потребує відкладення процедури вимірювання на термін встановлення радіоактивної рівноваги між РН  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{90}\text{Y}$  для накопичення останнього. Вимірювання активності  $^{90}\text{Sr}$  при цьому для отримання максимальної точності необхідно проводити не раніше ніж через 14 діб після завершення процедури озонення. Розглянутий в даній роботі варіант випробування обґрунтовує умови та можливість встановлення результату на 3 – 4 добу.

**Висновки.** Представлений та обговорений матеріал служить підґрунтям наступних положень, які резюмують результати проведеного дослідження:

1. Розглянуто критерій безпечного вмісту РН  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продукції аграрного сектору та рибного промислу. Вдосконалено модель і алгоритм розрахунку показника придатності продукції до споживання. Вплив коефіцієнтів запасу  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$  та  ${}^mZ(i\chi_{Sr})$  на значення показника вперше поширено в тому числі і на область, яка є дотичною до мінімального значення параметрів кратності питомої активності  $i\chi_{Cs} = i\chi_{Sr} = 1,0$ . Наведено співвідношення для встановлення величини показника придатності та необхідних для розрахунку коефіцієнтів  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$  та  ${}^mZ(i\chi_{Sr})$ . Використано форму подання результатів спектрометричного вимірювання активності РН  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у відносних одиницях – одиницях кратних МВПА спектрометра, які визначаються величиною  $i\chi_{Cs}$  та  $i\chi_{Sr}$ . Представлено спрощене співвідношення критерію для випадку, в якому активність РН  $^{90}\text{Sr}$  є меншою за МВПА<sub>Sr</sub>.

2. Проведення розрахунку показника придатності шляхом врахування розподілу коефіцієнтів запасу  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$  та  ${}^mZ(i\chi_{Sr})$ , дослідження їх впливу на кінцеве значення показника призводить до збільшення, як його середнього значення, так і похибки визначення. Розраховані за методом мінімізації квадратів відхилень на основі нормованої функції Гауса величини зазначених коефіцієнтів при збільшенні параметрів кратності  $i\chi_{Cs}$  та  $i\chi_{Sr}$  наближаються до постійних значень. Величина та положення останніх в координатах  ${}_{on}\tilde{\delta}_{Cs, i\chi_{Cs}}$  і  ${}_{on}\tilde{\delta}_{Sr, i\chi_{Sr}}$  визначається як асимптота, до якої наближається відповідна функції Гауса. Ця функція апроксимує експериментальну залежність відносної похибки від параметру кратності. При цьому, внаслідок її наявності нові значення відносних похибок вимірювання  ${}_i\tilde{\delta}_{Cs}$  та  ${}_i\tilde{\delta}_{Sr}$  можуть, як перевищувати, так і бути меншими за виміряні значення  ${}_i\tilde{\delta}_{Cs}$  і  ${}_i\tilde{\delta}_{Sr}$ . Одночасно, розрахована величина  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$  і  ${}^mZ(i\chi_{Sr})$  не може бути меншою ніж 1,0.

3. Представлено дані щодо оціночного параметру  ${}^{Cs}K_{Kon, i\chi_{Cs}}$  при ДР  $U_{Sr} = 30$  Бк/кг і  $U_{Sr} = 20$  Бк/кг для випадку спрощеної схеми контролю. Вони засвідчили, що випробування продовольчої сировини доцільно починати з вимірювання активності РН  $^{90}\text{Sr}$  за використання неконцентрованого лічильного зразка. Результат вимірювання визначатиме подальше рішення щодо можливості використання для встановлення величини активності РН  $^{137}\text{Cs}$  процедури скорочення часу випробування. Встановлені значення параметру  ${}^{Cs}K_{Kon, i\chi_{Cs}}$  у випадку різних величин  ${}^mZ(i\chi_{Cs})$  створюють підґрунтя для оцінювання балансу між величинами коефіцієнту концентрування, параметром кратності активності РН  $^{137}\text{Cs}$ , значенням МВПА<sub>Cs</sub> спектрометра. Такий підхід дозволяє встановити, як необхідні для проведення вимірювань величини МВПА<sub>Cs</sub>, так і величину діапазону активності РН  $^{137}\text{Cs}$ , в межах якого наявна активність буде відповідати критерію радіаційної безпеки досліджуваного зразка аграрної продукції.

4 Проведене дослідження направлене на підвищення коректності прийняття рішення, гарантії щодо визнання продукції придатною до споживання. Воно легко адаптується до випробувань продуктів харчування, в яких значення ДР є тотожними розглянутим. Практична цінність наведених результатів полягає у використанні запропонованих моделі, підходів та співвідношень. Останні забезпечують визначення параметрів випробування для наявного бета-спектрометра та визначають можливості для скорочення загального часу дослідження. Результати роботи також можуть становити інтерес при контролі радіаційної безпеки інших видів продукції, зокрема рослинної сировини для тваринництва, сировини будівельної індустрії, коли результат випробування може змінювати сферу застосування.

## Література

- 1 Грабовський В.А. Особливості забруднення  $^{137}\text{Cs}$  ґрунтів, рослин і грибів Українських Карпат / В.А. Грабовський, О.С. Дзензелюк, А.В. Трофімук // Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Фізика. – 2014, № 35. – С. 103–108.
- 2 Дозовые нагрузки на население Украины от излучения естественных ( $^{210}\text{Po}$ ) и чернобыльских радионуклидов при употреблении морепродуктов из черноморских рыб и моллюсков / Г.Е. Лозоренко, Г.Г. Поликарпов, Н.Ю. Мирзоева, Н.Н. Терещенко // Наук. праці Чорн. нац. ун.-у ім. П. Могили. Миколаїв: Чорн. нац. ун.-т ім. П. Могили, 2012, Вип. 173, Т. 185, Сер. "Техногенна безпека". – С. 28–31.
- 3 Допустимі рівні вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у продуктах харчування та питній воді: ГН 6.6.1.1-130-2006 / Санітарний лікар, Юр., виробн.-практ. журн., К.: МПП «Ліно», №3, 2008. – С. 61–70.
- 4 Дослідження вмісту цезію-137 та стронцію-90 у продуктах харчування з оцінкою доз опромінення населення і можливих негативних наслідків для здоров'я [Ел. ресурс]/ Куцак А.В., Севальнев А.І., Костенецький М.І. [та ін.]// Вістник проблем біології і медицини. – 2017, Вип.1 (135). – С. 75–78. – Режим доступу в журнал: [https://vpbm.com.ua/ua/vipusk-1-\(135\)-2017/8735](https://vpbm.com.ua/ua/vipusk-1-(135)-2017/8735).
- 5 Дюдяєва О.А. Харчова безпека вітчизняної продукції аквакультури як гарантована передумова виходу на зовнішні ринки / О.А. Дюдяєва, В.В. Бех // Водні ресурси та аквакультура. Науковий журнал. Херсон: Видавничий дім "Гельветика". – 2020, №1. – С. 44–60.
- 6 Значення шапкових грибів у міграції  $^{137}\text{Cs}$  на території Чернігівської області / Ю.О. Бондар, О.В. Дмитренко, С.П. Ковальова, С.П. Ткаченко-Капарська // Агроєкол. Журнал, К.: Ін.-т агроєкології і природокористування НААН. – 2019, №4. – С. 22–28.
- 7 Кимаковська Н. О. Наукове обґрунтування і методології розробки «Допустимих рівнів вмісту радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у сировині рослинного та тваринного походження» [Електронний ресурс] / Н. О. Кимаковська // Наукові доповіді НУБіП України. – 2012, № 3 (32). – Режим доступу до журналу: [http://nd.nubip.edu.ua/2012\\_3/12kno.pdf](http://nd.nubip.edu.ua/2012_3/12kno.pdf).
- 8 Орлов П.М. Радиационный мониторинг сельскохозяйственных угодий Российской Федерации / П.М. Орлов, М.И. Лунев, В.Г. Сычев. —М.: ВНИИА имени Д.Н. Прянишникова, 2015. – 176 с.
- 9 Оцінка якості життя та радіаційної безпеки сільського населення радіоактивно забруднених територій: монографія / [ Л.Д. Романчук, В.А. Довженко, Т.П. Федонюк та ін.]; за заг. ред. Л. Д. Романчук. Житомир: Графіум, 2017. – 268 с.
- 10 Переволоцкий А.Н. Оценка содержания  $^{137}\text{Cs}$  в лесных грибах и ягодах в зоне штатных выбросов Белорусской АЭС / А.Н. Переволоцкий, Т.В. Переволоцкая // Радиация и риск. – 2013, т. 22, № 2. – С. 61–65.
- 11 Перепелятников Г.П. Радиоэкологическое нормирование допустимого содержания  $^{137}\text{Cs}$  в почвах сельскохозяйственных угодий Украины, загрязненных после аварии на ЧАЭС / Г.П. Перепелятников, Н.А. Кимаковская // Агрохимический вестник. М.: 2013, № 6. – С. 23–27.
- 12 Романчук Л.Д. Особливості формування дози внутрішнього опромінювання населення за споживання риби водойм Полісся / Л.Д. Романчук, С.П. Вербельчук, Т.В. Вербельчук // Агроєкол. Журнал, К.: Ін.-т агроєкології і природокористування НААН. – 2016, №1. – С. 127–131.
- 13 Романчук Л. Д. Оцінка вмісту радіонукліду  $^{137}\text{Cs}$  у продуктах харчування мешканців радіоактивно забруднених територій у віддалений період після аварії на ЧАЕС. / Л.Д. Романчук, О.В. Лопатюк, С.П. Ковальова // Наукові горизонти. – 2019, № 8 (81). С. 82–86.
- 14 Сінченко В.Г. Спектрометричний контроль за вмістом радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у морепродуктах та сільськогосподарській і харчовій продукції: Метрологічний аспект випробувань неконцентрованих зразків/ В.Г. Сінченко // Наук. праці Чорн. нац. ун.-у ім. П. Могили. Миколаїв: Чорн. Нац. Ун.-т ім. П. Могили, 2017, Вип. 277, Т. 289, Сер. "Техногенна безпека. Радіобіологія", С. 91–100.
- 15 Сінченко В.Г. Про спектрометрію радіонуклідів  $\text{Cs-137}$  і  $\text{Sr-90}$  у поверхневих прісних водах та відповідність їх активності допустимим рівням / В.Г. Сінченко // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. Наук.-техн. журнал. Ів-Франківськ: Вид.-во ІФНТУНГ, 2020, №2(22). – С. 58–71.
- 16 Фурдичко О. І. Радіоекологічна безпека аграрних і лісових екосистем у віддалений період після аварії на ЧАЕС. / О.І. Фурдичко // Агроєкол. Журнал, К.: Ін.-т агроєкології і природокористування НААН. – 2016, №1. – С. 6–13.

17 Чорна В.І. Міграція  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у ґрунтах і сільськогосподарській продукції Дніпропетровської області після аварії на Чорнобильській АЕС / В.І. Чорна, В.О. Сироватко // Наукові праці Чорном. нац. ун.-ту ім. П. Могили, Чорн. нац. ун.-т ім. П. Могили, Миколаїв: 2016, Вип. 268, Т. 280, Сер. "Техногенна безпека. Радіобіологія", С. 115–122.

18 Low content of radionuclides in natural environment and production as a rationale for development of recreational potential of Northern Bukovina / Natali Omel'chenko, Valeriy Sinchenko, Myron Rogozynskyi, Oksana Mykytyuk // *Food and Environment Safety*. 2017, Volume XVI, Issue 2. – P. 111–116

19 Thenatural radioactivity of the Carpathian national parks and radon evaluation / V. Maslyuk, O. Symkanich, N. Svatyuk, O. Parlag, S. Sukharev. *Nukleonika*. 2016, 61(3). P. 351–356.

**V. Sinchenko**

*L. I. Medved's research center of preventive toxicology, food and chemical safety, Ministry of Health, Ukraine (State Enterprise)*

## METHODOLOGICAL ASPECTS OF BETA-SPECTROMETRIC METHOD OF CONTROL OVER RADIATION SAFETY OF AGRICULTURAL AND FISHING PRODUCTS

The article deals with the issue of determining the suitability index (SI) of radionuclide-contaminated (RN) agricultural and fishing products as an indicator of safety from the combined action on the human body of RN  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ . A new approach to calculating SI is presented. It combines the content of these RN in the product and the value of permissible levels of their activity. The approach is based on the assumption of the dependence of PP on the values of the activity multiplicity parameter. The parameters are determined in units of the minimum measured specific activity (MMSA) of the spectrometer for each of the RN. The influence of stock coefficients on the PP as a compensator of errors in the calculation of MMSA values is investigated. The stock ratio is defined as a function of the multiplicity parameter.

The calculation of the values of the stock coefficient was performed using the model for describing the distribution of the relative error of activity measurement by the multiplicity parameter. The normalized Gaussian function was used. The argument of the latter one is represented by two parameters. One is the activity multiplicity parameter, the other one regulates the peak width. The parameters of the Gaussian function are determined by the method of minimizing the squares of deviations. At such values, the exponent optimally describes the experiment result. A universal equation for SI calculation has been obtained. The equation combines two separate ratios, according to which the SI relative to the combined effect of RN  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  is usually calculated when analyzing the radiation quality of food raw materials and food.

The results of calculations of SI, stock coefficient and necessary parameters for this purpose according to the measurement of RN  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  activity in mushrooms of forest origin are presented. The possibility of preliminary estimation of technological parameters of test is shown. The method of reducing the study time by obtaining data using concentrated and non-concentrated samples is substantiated. The efficiency of the SI calculation algorithm in the case of multiplicity parameters, the value of which is close to the measurement low limit, is proved. The presented ratios provide an additional guarantee in the correctness of the decision on the suitability of the product.

**Key words:** radiation safety of agricultural resources and ecosystems; fishing products; supervision over the radiation quality of food raw materials; spectrometry of radionuclides  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$

## References

1 Hrabovskyi V.A. Osoblyvosti zabrudnennia  $^{137}\text{Cs}$  hruntiv, roslyn i hrybiv Ukrainskykh Karpat / V.A. Hrabovskyi, O.S. Dzendzeliuk, A.V. Trofimuk // *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu*. Seria: Fizyka. – 2014, № 35. – S. 103–108.

2 Dozovye nahruzki na naselenie Ukrainy ot izlucheniia estestvennykh (210Ro) i chernobyl'skikh radionuklidov pri upotreblenii moreproduktov iz chernomorskiikh ryb i molliuskov / H.E. Lozorenko, H.H. Polikarpov, N.Iu. Mirzoeva, N.N. Tereshchenko // *Nauk. pratsi Chorn. nats. un.-u im. P. Mohyly. Mykolaiv: Chorn. nats. un.-t im. P. Mohyly*, 2012, Vyp. 173, T. 185, Ser. "Tekhnohenna bezpeka". – S. 28–31.

3 Dopustymi rivni vmistu radionuklidiv  $^{137}\text{Cs}$  ta  $^{90}\text{Sr}$  u produktakh kharchuvannia ta pytnii vodi: HN 6.6.1.1-130-2006 / Sanitarnyi likar, Yur., vyrobn.-prakt. zhurn., K.: MPP «Lino», №3, 2008. – S. 61–70.

4 Doslidzhennia vmistu tseziuu-137 ta strontsiuu-90 u produktakh kharchuvannia z otsinkoiu doz oprominennia naselennia i mozhlyvykh nehatyvnykh naslidkiv dlia zdorovia [El. resurs]/ Kutsak A.V., Sevalniev A.I., Kostenetskyi M.I. [ta in.]// Vistnyk problem biolohii i medytsyny. – 2017, Vyp.1 (135). – S. 75–78. – Rezhym dostupu v zhurnal: [https://vpbm.com.ua/ua/vipusk-1-\(135\),-2017/8735](https://vpbm.com.ua/ua/vipusk-1-(135),-2017/8735).

5 Diudiaieva O.A. Kharchova bezpeka vitchyznianoï produktsii akvakultury yak harantovana peredumova vykhodu na zovnishni rynky / O.A. Diudiaieva, V.V. Bekh // Vodni resursy ta akvakultura. Naukovyi zhurnal. Kherson: Vydavnychiy dim "Helvetyka". – 2020, №1. – S. 44–60.

6 Znachennia shapkovykh hrybiv u mihratsii 137 Ss na terytorii Chernihivskoi oblasti / Yu.O. Bondar, O.V. Dmytrenko, S.P. Kovalova, S.P. Tkachenko-Kaparska // Ahroekol. Zhurnal, K.: In.- t ahroekolohii i pryrodokorystuvannia NAAN. – 2019, №4. – S. 22 –28.

7 Kymakovska N. O. Naukove obgruntuvannia i metodolohii rozrobky «Dopustymykh rivniv vmistu radionuklidiv 137Cs i 90Sr u syrovyni roslynnoho ta tvarynnoho pokhodzhennia» [Elektronnyi resurs] / N. O. Kymakovska // Naukovi dopovidi NUBiP Ukrainy. – 2012, № 3 (32). – Rezhym dostupu do zhurnalu: [http://nd.nubip.edu.ua/2012\\_3/12kno.pdf](http://nd.nubip.edu.ua/2012_3/12kno.pdf).

8 Orlov P.M. Radiatsyonnyi monitoryng selskokhoziaistvennykh uhodii Rossiskoi Federatsii / P.M. Orlov, M.Y. Lunev, V.H. Sychev. –M.: VNIIA imeni D.N. Prianishnikova, 2015. – 176 s.

9 Otsinka yakosti zhyttia ta radiatsiinoï bezpeky silskoho naselennia radioaktyvno zabrudnennykh terytorii: monohrafiia / [ L.D. Romanchuk, V.A. Dovzhenko, T.P. Fedoniuk ta in.]; za zah. red. L. D. Romanchuk. Zhytomyr: Hrafiun, 2017. – 268 s.

10 Perevolotskii A.N. Otsenka soderzhaniia 137Cs v lesnykh hribakh i yahodakh v zone shtatnykh vybrosov Belorusskoi AES / A.N. Perevolotskii, T.V. Perevolotskaia // Radiatsiia i risk. – 2013, t. 22, № 2. – S. 61–65.

11 Perepeliatnikov H.P. Radioekolohicheskoe normirovanie dopustimoho soderzhania 137Cs v pochvakh selskokhoziaistvennykh uhodii Ukrainy, zahriaznennykh posle avarii na ChAES / H.P. Perepeliatnikov, N.A. Kimakovskaia // Ahrokhimicheskii vestnik. M.: 2013, № 6. – S. 23–27.

12 Romanchuk L.D. Osoblyvosti formuvannia dozy vnutrishnoho oprominiuvannia naselennia za spozhyvannia ryby vodoim Polissia / L.D. Romanchuk, S.P. Verbelchuk, T.V. Verbelchuk // Ahroekol. Zhurnal, K.: In.- t ahroekolohii i pryrodokorystuvannia NAAN. – 2016, №1. – S. 127 –131.

13 Romanchuk L. D. Otsinka vmistu radionuklidu 137Cs u produktakh kharchuvannia meshkantsiv radioaktyvno zabrudnennykh terytorii u viddalenyi period pislia avarii na ChAES. / L.D. Romanchuk, O.V. Lopatiuk, S.P. Kovalova // Naukovi horyzonty. – 2019, № 8 (81). S. 82–86.

14 Sinchenko V.H. Spektrometrychnyi kontrol za vmistom radionuklidiv 137Cs i 90Sr u moreproduktakh ta silskohospodarskii i kharchovii produktsii: Metrolohichnyi aspekt vyprobuvan nekonsentrovanykh zrazkiv/ V.H. Sinchenko // Nauk. pratsi Chorn. nats. un.-u im. P. Mohyly. Mykolaiv: Chorn. Nats. Un.-t im. P. Mohyly, 2017, Vyp. 277, T. 289, Ser. "Tekhnohenna bezpeka. Radiobiolohiia", S. 91–100.

15 Sinchenko V.H. Pro spektrometriiu radionuklidiv Cs-137 I Sr-90 u poverkhnevnykh prisnykh vodakh ta vidpovidnist yikh aktyvnosti dopustymym rivniam / V.H. Sinchenko // Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia. Nauk.-tekhn. zhurnal. Iv-Frankivsk: Vyd.-vo IFNTUNH, 2020, №2(22). – S. 58–71.

16 Furdychko O. I. Radioekolohichna bezpeka ahrarnykh i lisovykh ekosystem u viddalenyi period pislia avarii na ChAES. / O.I. Furdychko // Ahroekol. Zhurnal, K.: In.-t ahroekolohii i pryrodokorystuvannia NAAN. – 2016, №1. – S. 6–13.

17 Chorna V.I. Mihratsiia 137Cs i 90Sr u hruntakh i silskohospodarskii produktsii Dnipropetrovskoi oblasti pislia avarii na Chornobylskii AES / V.I. Chorna, V.O. Syrovatko // Naukovi pratsi Chornom. nats. un.- tu im. P. Mohyly, Chorn. nats. un.-t im. P. Mohyly, Mykolaiv: 2016, Vyp. 268, T. 280, Ser. "Tekhnohenna bezpeka. Radiobiolohiia", S. 115–122.

18 Low content of radionuclides in natural environment and production as a rationale for development of recreational potential of Northern Bukovina / Natali Omelchenko, Valeriy Sinchenko, Myron Rogozynskyi, Oksana Mykytyuk // Food and Environment Safety. 2017, Volume XVI, Issue 2. – R. 111–116

19 Thenatural radioactivity of the Carpathian national parks and radon evaluation / V. Maslyuk, O. Symkanich, N. Svatyuk, O. Parlag, S. Sukharev. Nukleonika. 2016, 61(3). P. 351