

DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2021-5-93-3>

УДК 504.61

Пількевич Ю.Г.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Розорінов Г.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ткаченко Т.М.

Київський національний університет будівництва і архітектури

РАДІОАКТИВНЕ ЗАБРУДНЕННЯ РИБ І ВИМІРЮВАННЯ МАЛИХ ІНТЕНСИВНОСТЕЙ ІОНІЗУЮЧИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Анотація. Одним з важливих джерел забруднення риби є передача радіоактивних речовин через харчові ланцюги. Більшість риб харчуються планктоном, який здатний накопичувати радіонукліди до концентрацій в сотні і тисячі разів більше, ніж в навколишній воді. Тому при низькому вмісті радіоактивних речовин у воді їх споживання риби в першу чергу обумовлено зараженою їжею. При знаходженні у воді, що забруднена радіоактивними речовинами, риби отримують зовнішнє опромінення. Адсорбована на поверхні їх тіла активність створює опромінення організму. У свою чергу радіоактивні речовини, що накопичуються в органах і тканинах, створюють внутрішнє джерело опромінення. Накопичення радіоактивних речовин органами і тканинами риб, а також розподіл і виділення їх залежить від цілого ряду умов, основними з яких є: хімічна природа радіоізоотопів і періоди їх напіврозпаду, концентрація радіоізоотопів у воді, вид, вік і фізіологічний стан риб, екологічні умови. Кумуляція радіоізоотопів органами і тканинами риб залежить від концентрації цих радіоізоотопів у воді і часу перебування в ній риб. Чим вище ступінь радіоактивності води, тим більше ступінь забрудненості риб. Наведено деякі види риб, впорядковані за зростанням середнього рівня вмісту ^{137}Cs . Запропоновано, обґрунтовано та експериментально перевірено методику вимірювання малих інтенсивностей іонізуючих випромінювань, засновану на вимірі t -поточних характеристик n -вимірних функцій розподілу ймовірностей часових інтервалів між імпульсами, що виробляються детекторами випромінювань. Показано, що розроблена методика дозволяє достовірно виявляти випромінювання з інтенсивностями в десятки разів нижче інтенсивності фонових випромінювань, при високих інтенсивностях фонового випромінювання. Застосування запропонованої методики в десятки разів зменшує час аналізу і знижує вимоги до екранування досліджуваних об'єктів від фонового випромінювання.

Ключові слова: забруднення, іонізуюче випромінювання, радіонукліди, риби.

Pil'kevych Yulii

Kyiv National University of Construction and Architecture

Rozorinov Heorhii

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Tkachenko Tetiana

Kyiv National University of Construction and Architecture

RADIOACTIVE POLLUTION OF FISH AND MEASUREMENT OF SMALL INTENSITY OF IONIZING RADIATION

Summary. One of the important sources of fish pollution is the transmission of radioactive substances through the food chains. Most fish feed on plankton, which is able to accumulate radionuclides to concentrations in hundreds and thousands of times more than in the surrounding water. Therefore, with a low content of radioactive substances in water, their fish consumption primarily due to infected food. When found in water contaminated with radioactive substances, fish will be external irradiation. Adsorbed on the surface of their body activity creates irradiation of the body. In turn, radioactive substances accumulated in organs and tissues create an internal radiation source. The accumulation of radioactive substances by organs and tissues of fish, as well as the distribution and selection of them depends on a number of conditions, the main of which are: the chemical nature of radioisotopes and periods of half-life, the concentration of radioisotopes in water, type, age and physiological state of fish, environmental conditions. Cumulation of radioisotopes by organs and tissues of fish depends on the concentration of these radioisotopes in water and time of stay in it. The higher degree of water radioactivity results in the greater degree of fish pollution. Some types of fish arranged as an average level of ^{137}CS content are presented. The method of measuring the small intensities of ionizing radiation, based on measurements t -current characteristics n -dimensional functions of the distribution of probabilities of time intervals between impulses, which are produced by radiation detectors, are substantiated and experimentally tested. It is shown that the developed method allows to significantly detect radiation with intensities in tens of times lower than the intensity of background radiation, with high intensities of background radiation. The application of the proposed method in dozens decreases the analysis time and reduces the requirements for screening of investigated objects from background radiation.

Keywords: pollution, ionizing radiation, radionuclides, fish.

Постановка проблеми. Забруднення риби відбувається шляхом прямого поглинання радіоактивних речовин поверхнею тіла, через їжу і в результаті інших обмінних процесів між організмом і навколишнім середовищем. Радіоактивні елементи проникають у внутрішні органи риб через шкіру, зябра і рот.

Одним з важливих джерел забруднення риби є передача радіоактивних речовин через харчові ланцюги. Молода більшість риб і багато дорослих риб харчуються планктоном, який здатний накопичувати радіонукліди до концентрацій в сотні і тисячі разів більше, ніж в навколишній воді. Тому при низькому вмісті радіоактивних речовин у воді їх споживання риби в першу чергу обумовлено зараженою їжею.

При знаходженні у воді, що забруднена радіоактивними речовинами, риби отримують зовнішнє опромінення. Адсорбована на поверхні їх тіла активність створює опромінення організму. У свою чергу радіоактивні речовини, що накопичуються в органах і тканинах, створюють внутрішнє джерело опромінення [1–3].

Радіонукліди так само, як і всі стабільні нукліди, надходять в тіло гідробіонтів через травний тракт, зябровий апарат і покривні тканини. Інтенсивність засвоєння організмом радіонуклідів багато в чому визначається ступенем фізико-хімічної тотожності їх зі стабільними нуклідами, необхідними для оптимального функціонування біонта, а також агрегатним станом, концентрацією у воді, функціональним станом організму, тощо. Живі організми засвоюють нукліди одного елемента практично в рівній мірі, так як за хімічними властивостями вони тотожні.

Інтенсивність надходження в організм радіонукліда в істотній мірі залежить від шляху його проникнення. Радіоактивні речовини, що містяться в твердих частинках, гідробіонтами практично не засвоюються. На відміну від цього радіонукліди, що знаходяться в іонному стані, поглинаються гідробіонтами інтенсивно [2; 4].

Накопичення радіоактивних речовин органами і тканинами риб, а також розподіл і виділення їх залежить від цілого ряду умов, основними з яких є: хімічна природа радіоізоотопів і періоди їх напіврозпаду, концентрація радіоізоотопів у воді, вид, вік і фізіологічний стан риб, екологічні умови.

Кумуляція радіоізоотопів органами і тканинами риб залежить від концентрації цих радіоізоотопів у воді і часу перебування в ній риб. Чим вище ступінь радіоактивності води, тим більше ступінь забрудненості риб.

При одноразовому забрудненні риб навіть більшими кількостями радіоізоотопів накопичення їх в організмі буває незначним. При тривалому ж забрудненні низькими концентраціями радіоізоотопи можуть накопичуватися в організмі у великих кількостях.

Молоді і швидкозростаючі риби кумулюють радіоізоотопи швидше і у відносно великих кількостях, ніж риби середнього і старшого віку. У донних риб накопичення радіоізоотопів йде швидше, ніж у пелагічних. Таким чином, екологічні умови і фізіологічний стан риб відіграють значну роль в забрудненні їх радіоактивними речовинами [5; 6].

Процес накопичення цезію-137 водними організмами в природних умовах вимагає кількісної оцінки і прогнозування переходу штучних радіонуклідів із зовнішнього середовища в живі організми.

Накопичення радіонуклідів в тканинах багато в чому залежить від фізіологічної активності риби: чим активніше її спосіб життя і чим вона молодша, тим, як правило, більше відкладається в її тканинах радіонуклідів. Інтенсивність накопичення радіонуклідів у риб схильна так само до видовим коливанням.

Вода водойм містить відносно невелику кількість радіонуклідів і виконує роль екрану, який перешкоджає вносу радіонуклідів з донних відкладень. Радіонукліди, що потрапили в річки і озера, осіли на дно, але оскільки водні рослини і безхребетні тварини мають здатність легко накопичувати розчинні у воді мінеральні речовини, в тому числі і радіонукліди, частина їх, головним чином цезій-137 і стронцій-90, концентрується в гідробіонтах: личинках комах, зоо- і фітопланктоні, водоростях, молюсках [6; 7].

При цьому вимір потоків іонізуючих випромінювань малої інтенсивності є в даний час нетривіальною задачею.

Метою роботи є виявлення умов накопичення радіоактивних речовин органами і тканинами риб та вимір потоків іонізуючих випромінювань малої інтенсивності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Радіонукліди, що надійшли в організм риб, концентруються в залежності від своїх хімічних властивостей в різних органах і тканинах. Це-

Таблиця 1

Види риб, впорядковані за зростанням середнього рівня вмісту ¹³⁷Cs

Вид риби	Максимальний, Бк/кг	Мінімальний, Бк/кг	Середній, Бк/кг
Короп	10	10	10
Краснопірка	79	20	49,5
Минь	84	17	50
Лящ	105	15	60
Лин	112	13	62
Йорж	84	84	84
Канальний сом	225	179	202
Рак	419	132	275
Карась	842	7	424
Плотва	1193	13	603
Сом	1085	179	632
Щука	1287	14	650
Окунь	2414	36	1225

Джерело: розроблено авторами за даними [5; 6]

зій-137, подібний за хімічним складом з калієм, концентрується в м'язах риб і молюсків, а стронцій-90, який є аналогом кальцію, накопичується в кістковій тканині риб і в раковинах молюсків. Відрізняються ці радіонукліди і за швидкістю виведення з організму, значно повільніше виводиться стронцій-90, локалізований в кістковій тканині риб і раковинах, цезій-137 порівняно швидко виводиться з м'язів.

Найбільш забруднені цезієм-137 хижі види риб, такі як окунь, щука, сом. Рівень накопичення радіоцезію в організмах цих видів риб змінювався у окуня від 42 до 2414 Бк/кг (сира маса), у щуки – від 14 до 1287 Бк/кг, у сома – від 179 до 1085 Бк/кг. Найменш забруднені короп (*Cyprinus carpio*), краснопірка (*Scardinius erythrophthalmus*), минь (*Lota lota*), лин (*Tinca tinca*). У таблиці 1 наведені деякі види риб, які ранжуються за зростанням середнього рівня вмісту цезію-137 в організмі.

Виявлення потоків іонізуючих випромінювань малої інтенсивності здійснюється в даний час, як правило, шляхом проведення безперервного спектрального аналізу радіаційної обстановки протягом десятків годин [8; 9]. При цьому в якості детекторів випромінювань, в основному, використовують рідинні або твердотільні сцинтилятори, за допомогою яких виділяють області в енергетичних спектрах, відповідних пікам енергії певних радіонуклідів, і/або вимірюють середню інтенсивність випромінювань (середнє число розпадів в одиницю часу).

Для забезпечення необхідної точності результатів вимірювання в спеціальному обладнанні, як наприклад сцинтиляційному спектрометрі енергії бета випромінювання СЕБ-01-70, застосовується високоефективний низькофоновий захист (сталь і свинець), який знижує рівень фонового випромінювання до значень, що не перевищують 0,35 імпл/с. Однак час вимірювання, необхідний для досягнення високої достовірності результатів вимірювання, при інтенсивності випромінювань порядку 1... 3 імпл/с досягає 24-х годин.

Методи багатовимірного імовірнісного аналізу і стохастичного посилення дозволяють ефективно вирішити завдання виміру інтенсивності іонізуючих випромінювань, зменшення впливу природного радіаційного фону на точність вимірювань і зменшення часу вимірів [10–12].

Нехай t_i , $i = 0, N$ – момент появи i -го імпульсу на виході детектора випромінювань, що реєструє іонізуюче випромінювання. Тоді спільна функція розподілу ймовірностей того, що інтервали часу між появами кожної пари суміжних імпульсів не перевищують деякого заданого інтервалу часу T , має вигляд

$$P\{t_{k+1} - t_k < T, t_{k+2} - t_{k+1} < T, \dots, t_{k+N+1} - t_{k+N} < T\}, k = 0, 1, \dots (1)$$

Відзначимо, що величина, зворотна середньому значенню інтервалу між імпульсами, які надходять з детектора випромінювань, являє собою не що інше, як середню інтенсивність випромінювання.

Як показано в роботі [12], завдання вимірювання спільних функцій розподілу ймовірностей вирішується за допомогою пристрою, структура якого показана на рис. 1.

Виявлене детектором 1 іонізуюче випромінювання перетворюється в послідовність випадкових у часі імпульсів, що за допомогою формувача 2 здобувають форму імпульсів однакової тривалості. Ці імпульси далі обробляються в блоці 3 з метою оцінки спільної N -мірної функції розподілу ймовірностей інтенсивності випромінювання. Для цього спочатку вони надходять на один із двох входів блоку 4 вимірювання часових інтервалів (який може бути виконаний, наприклад, на основі лічильника, ПЗП, таймера й ін.), де інтервали їхнього проходження зіставляють з наперед заданим періодом часу аналізу T (часовим вікном) 5. Це відповідає алгоритмові

$$U(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{при } t_{k+1} - t_k < T, \\ 0, & \text{при } t_{k+1} - t_k \geq T, \end{cases} k = 0, 1, \dots (2)$$

Отримана в результаті порівняння цифрова послідовність $U(t_k)$ запам'ятовується в N -розрядному регістрі 6. Сигнали, що знімаються з рівнобіжних виходів регістра надходять на N -входовий елемент 7 збігу, що формує процес

$$Y(t_{k+1}, t_k, \dots, t_{k+1-(N-1)}) = \prod_{i=k+1-(N-1)}^{i=k+1} U(t_i), k = 0, 1, \dots (3)$$

Сигнал, отриманий у результаті збігу, подається в накопичуючий суматор 8 (t -поточний інтегратор), що формує оцінку спільної N -вимірної функції розподілу ймовірностей інтенсивності випромінювання

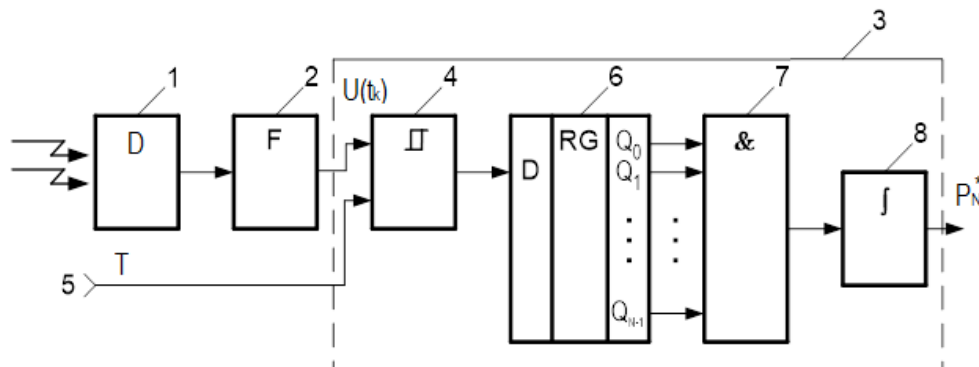


Рис. 1. Структурна схема вимірювача сумісних N -вимірних функцій розподілу ймовірностей інтенсивності випромінювання

Джерело: розроблено авторами

$$P^* \{t_{k+1} - t_k < T, t_{k+2} - t_{k+1} < T, \dots, t_{k+N} - t_{k+N-1} < T\} = \frac{1}{M} \sum_{i=k-M+1}^{i=k} Y(t_i, t_{i-1}, \dots, t_{i-N+1}), k = 0, 1, \dots, \quad (4)$$

де M – постійна накопичення.

Принцип роботи t -поточного інтегратора описаний, наприклад, у [13, с. 59–76]. Якщо позначити довірчий інтервал δ (асоційований з роздільною здатністю), а довірчу імовірність P_δ , то, наприклад, при $\delta\sqrt{M} = 1,5, P_\delta \leq 0,01$,

$M \approx 10000$, вимірювач забезпечує роздільну здатність по функції розподілу імовірностей не гірше 1,5%.

Як показано в роботі [12], довірчий інтервал δ і довірна імовірність P_δ для оцінок типу (4) пов'язані між собою співвідношенням

$$P_\delta = P \left\{ \left| P_N^* (t_{k+1} - t_k < T, k = \overline{0, N}) - P_N (t_{k+1} - t_k < T, k = \overline{0, N}) \right| > \delta \right\} \leq \frac{0,25}{M\delta^2}, \quad (5)$$

де $P_N (t_{k+1} - t_k < T, k = \overline{0, N})$ – справжнє значення функції розподілу. З умови (5) видно, що його права частина залежить тільки від постійної накопичення M і величини довірчого інтервалу δ , а це дозволяє оцінювати достовірність результатів вимірювань незалежно від виду розподілу ймовірностей досліджуваних процесів і виду розподілу самої оцінки (5). Важливо відзначити, що з незалежності довірчої ймовірності P_δ від розподілу інтервалів між імпульсами випливає, що при вимірюванні функцій розподілу ймовірностей інтенсивності випромінювання можна обмежитися обробкою такого числа M імпульсів, яке при заданій довірчій ймовірності P_δ забезпечує необхідну роздільну здатність δ .

Для перевірки запропонованої методики було проведено кілька серій експериментів з вимірювання t -поточної характеристики n -вимірної функції розподілу ймовірностей часових інтервалів між імпульсами, що виробляється детектором випромінювань. Вимірювалися одно-, трьох- і п'ятивимірні характеристики функції розподілу ймовірностей для фонового випромінювання, за відсутності джерела випромінювання і при його наявності. При цьому рівень випромінювання джерела становив 2%, 4% і 8% рівня фонового випромінювання. Результати вимірювань показані на рис. 2–4.

На цих рисунках по осі абсцис відкладено число імпульсів, що надходять на вимірювач t -поточних характеристик n -вимірних функцій розподілу ймовірностей з детектора випромінювань, а по осі ординат – значення відповідних характеристик. Значення аргументу T вибиралося рівним середньому значенню часових інтервалів між імпульсами фонового випромінювання. В описуваних серіях експериментів цей час дорівнює 0,1 с, що відповідає інтенсивності фону майже в 30 разів більше, ніж допустима інтенсивність фону при вимірах за допомогою серійного спектрометра СЕБ-01-70. Очевидно, що середньому часовому інтервалу 0,1 с відповідає середня інтенсив-

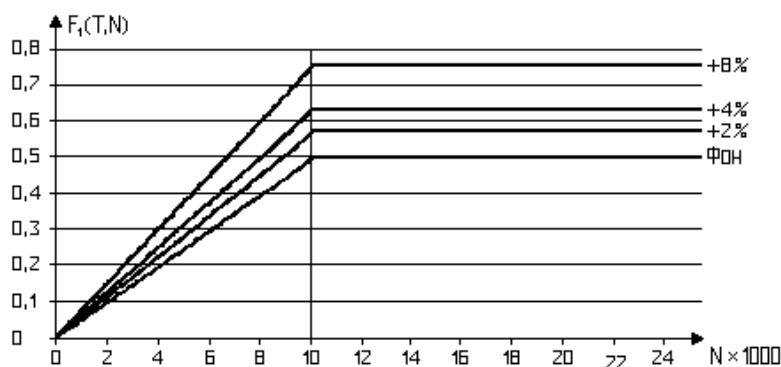


Рис. 2. Одновимірна характеристика функції розподілу ймовірностей

Джерело: розроблено авторами

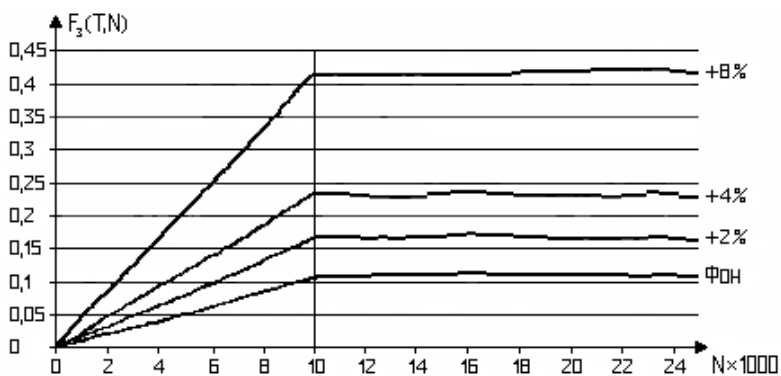


Рис. 3. Трьохвимірна характеристика функції розподілу ймовірностей

Джерело: розроблено авторами

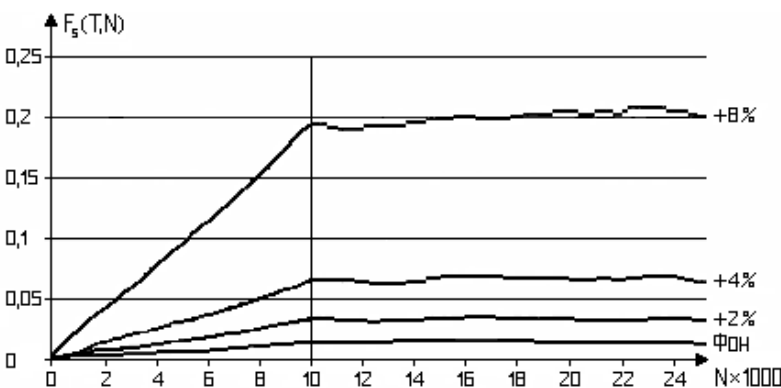


Рис. 4. П'ятивимірна характеристика функції розподілу ймовірностей

Джерело: розроблено авторами

ність імпульсів фону 10 імпл/с. На всіх рисунках проміжок значень $N = 0...10000$ відповідає часу встановлення пристрою, що вимірює відповідні характеристики n -вимірних функцій розподілу ймовірностей.

Багатовимірні функції розподілу ймовірностей є досить ефективним засобом для виявлення випромінювань, інтенсивність яких у багато разів менше інтенсивності фонового випромінювання. В даний час при виконанні датування по інтенсивності випромінювання ізотопу ^{14}C потрібна точність результатів не гірше 1%. Для отримання такої точності при досить великій довірчій ймовірності, відповідно до теорії прийняття статистичних рішень [11; 14] необхідно отримати щонайменше 10000 імпульсів випромінювання. При середній інтенсивності 10...20 розпадів за хвилину це призводить до того, що вимірювання повинні проводитися цілодобово. Це, в свою чергу, призводить до проблем, пов'язаних зі стабільністю параметрів апаратури, а також екранування джерел випромінювання, для забезпечення високого відношення сигнал/фон. Вимірювання одно-, трьох- і п'яти вимірних характеристик функцій розподілу ймовірностей дозволяють впевнено виявляти джерела випромінювання, інтенсивність яких в 50 разів менше інтенсивності фонового випромінювання. Тобто пропонується методика дозволяє аналізувати проби при значно більш високих рівнях фонового випромінювання, в порівнянні з відомими методиками, що, в свою чергу, дозволяє істотно знизити вимоги до захисту з низьким рівнем фону, і, відповідно, зменшити матеріалоемність і вагу застосовуваних захисних екранів.

З іншого боку, з нерівності (5) випливає, що необхідна точність і достовірність результатів вимірювань фактично повністю визначається числом імпульсів M , що надходять на вимірювач характеристик n -вимірних функцій розподілу ймовірностей з виходу детектора випромінювань, і не залежить від часу, протягом якого ці імпульси надходять на вимірювач. Це дозволяє виконува-

ти вимірювання при високих, порядку десятків імпульсів в секунду, інтенсивностях фонового випромінювання і автоматично призводить до істотного (в десятки разів) зменшення часу експозиції проб в порівнянні з відомими методами. З результатів вимірювань також випливає, що збільшення мірності вимірюваних характеристик функцій розподілу ймовірностей призводить до збільшення відносної чутливості вимірювань. При збільшенні інтенсивності випромінювання на 8%, тобто при збільшенні інтенсивності потоку імпульсів в 1,08 рази одновимірні характеристики функцій розподілу ймовірностей зростає в 1,25 рази, тривимірні – в 3,5 рази, а п'ятивимірні – приблизно в 10 разів. Зауважимо, що такий характер змін багатовимірних функцій розподілу ймовірностей тісно пов'язаний з описаним в [15] ефектом стохастичного посилення.

Висновки.

1. Інтенсивність засвоєння рибами радіонуклідів визначається ступенем фізико-хімічної токсичності їх зі стабільними нуклідами.

2. Накопичення радіоізотопів органами і тканинами риб залежить від концентрації їх у воді і часу перебування в ній риб.

3. Наведено деякі види риб, впорядковані за зростанням середнього рівня вмісту ^{137}Cs .

4. Запропоновано, обґрунтовано та експериментально перевірено методику вимірювання малих інтенсивностей іонізуючих випромінювань, засновану на вимірі t -поточних характеристик n -вимірних функцій розподілу ймовірностей часових інтервалів між імпульсами, що виробляються детекторами випромінювань.

5. Показано, що розроблена методика дозволяє достовірно виявляти випромінювання з інтенсивностями в десятки разів нижче інтенсивності фонового випромінювань, при високих інтенсивностях фонового випромінювання.

6. Застосування запропонованої методики істотно зменшує (в десятки разів) час аналізу і знижує вимоги до екранування досліджуваних об'єктів від фонового випромінювання.

Список літератури:

1. Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Кузьменко А.В. Зависимость коэффициентов накопления ^{137}Cs и ^{90}Sr рыбой от содержания калия и кальция в воде пресноводного водоема. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2011. Т. 51. № 3. С. 374–384.
2. Трапезникова В.Н., Трапезников А.В. Радиоэкология пресноводных экосистем как научная дисциплина. *Вопросы радиационной безопасности*. 2006. № 1(41). С. 35–58.
3. Смирнов С.Н., Герасимов Д.Н. Радиационная экология. Физика ионизирующих излучений. Москва : Издательский дом МЭИ, 2006. 326 с.
4. Василенко О.И. Радиационная экология. Москва : Медицина, 2004. 216 с.
5. Вербельчук С.П. Аналіз рівня забруднення ^{137}Cs та ^{90}Sr прісноводної риби та її внесок у формування дози внутрішнього опромінення сільських споживачів. *Вісник ДАУ*. 2003. № 1. С. 301–306.
6. Волкова О.М. Формування радіонуклідного забруднення іхтіофауни прісноводних водойм України. *Наук. вісник Національного аграрного університету*. Київ, 2006. № 102. С. 53–60.
7. Беляев В.В., Волкова Е.Н., Скиба В.В. Определение скорости поступления ^{90}Sr и ^{137}Cs в организм пресноводных рыб. *Гидробиологический журнал*. 2011. Т. 47. № 4. С. 112–120.
8. Силантьев А.Н. Спектрометрический анализ радиоактивных проб внешней среды. Ленинград : Гидрометеорологическое изд-во, 1969. 183 с.
9. Stuiver M., Reimer P.J., Braziunas T.F. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*. 1998. Vol. 40. P. 1127–1151.
10. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов : Пер. с англ. Москва : Мир, 1988. 488 с.
11. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Москва : Наука, 1984. 832 с.
12. Брягин О.В., Егоров А.К., Розоринов Г.Н. Об оценке многомерных функций распределения вероятностей речевых сигналов. *Реестрация, зберігання і обробка даних*. 2004. Т. 6. № 3. С. 41–49.
13. Мирский Г.Я.. Апаратурное определение характеристик случайных процессов. Москва : Энергия, 1972. 456 с.
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. Москва : Сов. радио, 1968. 552 с.

15. Егоров А.К., Розоринов Г.Н. Стохастическое усиление управляющих сигналов. *Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2004. Т. 2. № 1. С. 45–47.

References:

1. Khomutinin Yu.V., Kashparov V.A., Kuz'menko A.V. (2011) Zavisimost' koefitsientov nakopleniya ^{137}Cs i ^{90}Sr ryboi ot sodержaniya kaliya i kal'tsiya v vode presnovodnogo vodoema. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, vol. 51, no. 3, pp. 374–384.
2. Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V. (2006) Radioekologiya presnovodnykh ekosistem kak nauchnaya distsiplina. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti*, no. 1(41), pp. 35–58.
3. Smirnov S.N., Gerasimov D.N. (2006) Radiatsionnaya ekologiya. Fizika ioniziruyushchikh izlucheniy. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 326.
4. Vasilenko O.I. (2004) Radiatsionnaya ekologiya. Moscow: Meditsina, 216.
5. Verbel'chuk S.P. (2003) Analiz rivnya zabrudnennya ^{137}Cs ta ^{90}Sr prisnovodnoi ryby ta yii vnesok u formuvannya dozy vnutrishnoho oprominennia sil'skykh spozhyvachiv. *Visnyk DAU*, no. 1, pp. 301–306.
6. Volkova O.M. (2006) Formuvannya radionuklidnoho zabrudnennia ikhtiofauny prisnovodnykh vodoim Ukrainy. *Nauk. visnyk Natsionalnoho ahrarynoho universytetu*, no. 102, pp. 53–60.
7. Beliaev V.V., Volkova E.N., Skiba V.V. (2011) Opredelenie skorosti postuplennia ^{90}Sr i ^{137}Cs v organizm presnovodnykh ryb. *Gidrobiologicheskii zhurnal*, vol. 47, no. 4, pp. 112–120.
8. Silant'ev A.N. (1969). Spektrometricheskii analiz radioaktivnykh prob vneshnei sredy. Leningrad : Gidrometeorologicheskoe izd-vo, 183 p.
9. Stuiver M., Reimer P.J., Braziunas T.F. (1998) High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon*, vol. 40, pp. 1127–1151.
10. Dadzhion D., Mersero R. (1988) Tcifrovaia obrabotka mnogomernykh signalov. Moscow: Mir, 488 p.
11. Korn G., Korn T. (1984) Spravochnik po matematike dlia nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. Moscow: Nauka, 832 p.
12. Briagin O.V., Egorov A.K., Rozorinov G.N. (2004) Ob otsenke mnogomernykh funktsii raspredeleniia veroiatnostei rechevykh signalov. *Reiestratsiia, zberihannia i obrobka danykh*, vol. 6, no. 3, pp. 41–49.
13. Mirskii G.Ya. (1972) Aparaturnoe opredelenie kharakteristik sluchainykh protsessov. Moscow: Energiia, 456 p.
14. Levin B.R. (1968) Teoreticheskie osnovy statisticheskoi radiotekhniki. Kn. 2. Moscow: Sov. Radio, 552 p.
15. Egorov A.K., Rozorinov G.N. (2004) Stokhasticheskoe usilenie upravliaiushchikh signalov. *Visnyk Derzhavnoho universytetu informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii*, vol. 2, no. 1, pp. 45–47.