



Руслан Спиров,
научный сотрудник
отдела качества
окружающей
среды и продуктов
питания Института
радиобиологии НАН
Беларуси;
ruslan.spirov@yandex.ru



Наталья Тимохина,
заведующий отделом
качества окружающей
среды и продуктов
питания Института
радиобиологии НАН
Беларуси, кандидат
биологических наук;
natim-2006@tut.by



Александр Никитин,
заместитель
директора по научной
работе Института
микробиологии
НАН Беларуси, кандидат
сельскохозяйственных
наук;
nikitinale@gmail.com

Программный комплекс для расчета доз облучения изотопами ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am объектов биоты

УДК 004.9+004.891

Аннотация. В статье представлен разработанный программный комплекс для расчета доз облучения изотопами ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am объектов биоты, состоящий из 3 компонентов: мобильного приложения для описания реперных площадок и отбираемых образцов, приложения для настольных систем для ведения базы данных образцов на радиохимическом анализе и измерении удельной активности радионуклидов, веб-приложения для расчета доз облучения и первичной статистической обработки данных. Создана и обучена искусственная нейронная сеть для классификации спектров альфа-излучения, показана возможность ее применения для оценки качества проведения радиохимического анализа определения содержания изотопов плутония и америция. Преимущества разработки заключаются в простоте использования и унифицированном подходе к расчету доз облучения естественных популяций растений и животных.

Ключевые слова: программный комплекс, информационные технологии, дозы облучения, дозиметрия, биота, радиационная защита, искусственные нейронные сети.

Для цитирования: Спиров Р., Тимохина Н., Никитин А. Программный комплекс для расчета доз облучения изотопами ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am объектов биоты // Наука и инновации. 2024. №7. С. 77–83.

<https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-07-77-83>

Для организованного хранения и обработки больших массивов экспериментальных данных требуются информационные системы, позволяющие проводить цифровизацию отдельных отраслей экономики, повышать их эффективность и качество работы без значительных финансовых затрат [1–4].

Информатизация деятельности современной научной лаборатории дает преимущества при полу-

чении и накоплении данных, их проверки на соответствие требованиям качества, первичной обработки и представления результатов. С этой целью сегодня активно создается узкоспециализированное программное обеспечение, повышающее удобство работы научных сотрудников в лабораториях, имеющих специфический перечень выполняемых задач [5].

Для автоматизации обработки данных в реальном времени и

разработки систем поддержки принятия решений широко используются искусственные нейронные сети (ИНС), успешно справляющиеся с задачами классификации и прогнозирования [6, 7]. Совместно с устройствами, реализующими концепцию Интернета вещей, ИНС могут использоваться для создания голосовых помощников, встроенных в состав лабораторного оборудования, что существенно упрощает работу [8].

Данный подход находит применение и в радиоэкологии. Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) была разработана модель расчета доз облучения объектов биоты на основе дозовых коэффициентов (ДК) [9]. Дополнением к ней стало веб-приложение для расчета ДК радионуклидов для объектов биоты водных и наземных экосистем. Еще одно приложение для персональных компьютеров – ERICA Tool 2.0 [10] позволяет на основе предложенных ДК рассчитать мощность поглощенной дозы ионизирующего излучения с учетом удельной активности радионуклидов в почве и в организме растений или животных. Описанные программы – удобный инструмент получения информации о дозах облучения, однако они не охватывают весь процесс сбора и обработки данных, включающий в себя этапы закладки реперных (пробных) площадок и отбора образцов, а также определение содержания радионуклидов в пробах. В связи с этим актуально создание набора приложений, унифицирующих эти процессы для решения задач радиационной защиты биоты.

Целью авторов данной статьи была разработка программного комплекса для расчета доз облучения изотопами ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am объектов биоты.

Материалы и методы

Программное обеспечение разрабатывали на языке C# для платформы .Net 7 и .Net Framework. Реализация способов определения радионуклидов произведена в соответствии с методиками выполнения измерений ^{137}Cs и трансурановых элементов [11, 12]. Построение архитектуры нейронной сети, обучение и проверку качества проводили в модуле Neural Network приложения STATISTICA 64 Trial версии 10. Для расчета неопределенности измерений использовали соответствующие подходы [13, 14].

Результаты и обсуждение

Получение данных о дозах облучения объектов биоты можно разделить на 3 этапа:

- *закладка реперных площадок и отбор почвенных и биологических образцов;*
- *определение содержания радионуклидов в отобранных пробах;*
- *расчет доз облучения и первичная обработка полученных результатов.*

Каждый из них имеет свои задачи, выполняемые в разных условиях, что требует разработки

отдельного программного решения. Поскольку первый этап проводится в «полевых» условиях, наиболее удобным в использовании будет приложение для мобильных устройств – смартфонов или планшетов. Второй осуществляется в лаборатории, поэтому необходимо приложение для получения, хранения и обработки данных радиохимического анализа для ПК. Работа над научно-исследовательским проектом может выполняться несколькими лабораториями разных организаций. В этом случае возникает необходимость совместного доступа к результатам для коллективной работы и обсуждения, следовательно, для третьего этапа наиболее удобны веб-технологии. Схема программного комплекса представлена на рис. 1.

Таким образом, созданный программный комплекс включает в себя 3 компонента.

Мобильное приложение EcoJournal для ведения базы данных реперных площадок и отобранных образцов.

Это приложение для операционной системы Android 9 (и выше) разработано в среде Visual Studio Community с использованием фреймворка .Net MAUI. Информация пользователя хранится во встраиваемой базе данных SQLite. Работа с ней осуществляется

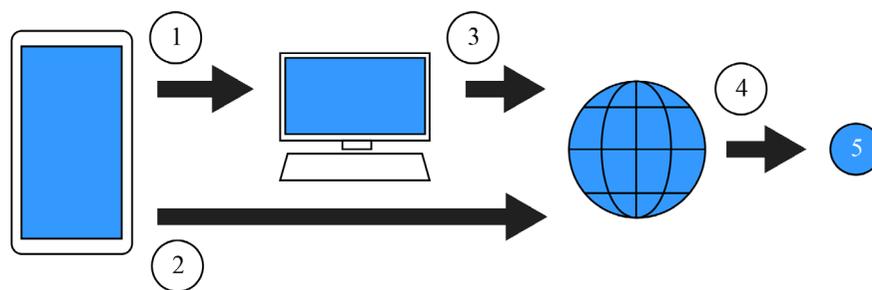


Рис. 1. Схема программного комплекса: 1 – информация об отобранных почвенных и биологических образцах; 2 – о реперных площадках; 3 – об удельной активности радионуклидов в образцах; 4 – о дозах облучения объектов биоты; 5 – принятие решения в области радиационной защиты

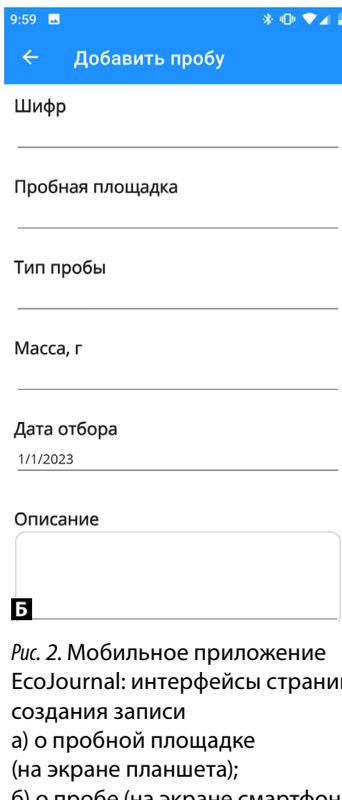
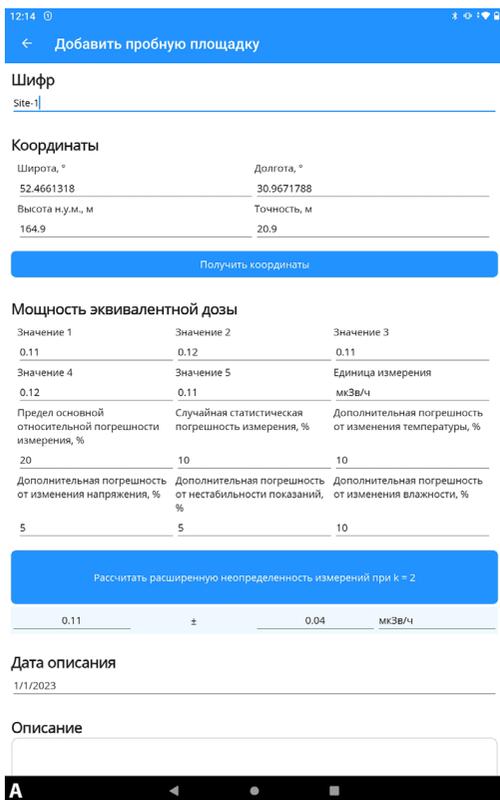


Рис. 2. Мобильное приложение EcoJournal: интерфейсы страниц создания записи а) о пробной площадке (на экране планшета); б) о пробе (на экране смартфона)

посредством объектно-ориентированной технологии доступа к данным Entity Framework Core 7 – выбор и ее, и фреймворка обусловлен открытым исходным кодом и кросс-платформенностью.

Функции, выполняемые программой:

- а) получение геопространственных данных;
- б) расчет неопределенности измерения мощности эквивалентной дозы γ -излучения;
- в) создание, просмотр, редактирование, удаление записей о пробных площадках и отобранных пробах.

Приложение состоит из главной страницы, страниц для работы с записями о реперных площадках и об отобранных образцах. Количество этих записей можно увидеть при запуске приложения. Кнопки «Пробные площадки» и «Пробы» при нажатии открывают страницы

с соответствующими списками, где также имеется кнопка «Добавить», которая позволяет перейти к добавлению новой записи (рис. 2 а, б). При нажатии на элемент списка открывается страница с информацией о пробной площадке или пробе, которая содержит также кнопки «Редактировать» и «Удалить».

Запись о пробной площадке содержит: ее шифр, географические координаты, мощность дозы, дату описания и само описание. Координаты (широта, долгота, высота над уровнем моря) определяются устройством при нажатии на кнопку «Получить координаты» на страницах создания и редактирования информации о площадке. Расчет расширенной неопределенности измерения мощности эквивалентной дозы осуществляется при нажатии на кнопку «Рассчитать неопределенность измерения».

Запись об отобранной пробе включает в себя: шифр пробы, пробную площадку, с которой проводили отбор, тип пробы, массу, дату отбора и описание.

Приложение RadioChem для персональных компьютеров – для ведения базы данных параметров промежуточных этапов и результатов радиохимического анализа.

Разработано для операционной системы Windows 10 (и выше) в среде Visual Studio Community на языке C# для целевой платформы .Net Framework 4.8. Данные пользователя хранятся в формате XML, что позволяет при необходимости их просматривать без использования специальной программы.

Функции приложения:

- создание, редактирование, просмотр, удаление сведений об образце, находящемся в процессе определения изотопов ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am ;
- расчет расширенной неопределенности измерения ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am ;
- экспорт базы данных в формат CSV;
- подготовка отчетов для печати;
- анализ спектра α -излучения изотопов плутония и америция искусственной нейронной сетью.

Процесс определения в пробе удельной активности ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am состоит из сушки образца до постоянной сухой массы, измерения удельной активности ^{137}Cs , трансурановых элементов, озонения, радиохимического анализа. Для каждого из этих этапов предназначена отдельная вкладка приложения. Интерфейс его окна представлен на рис. 3.

Вкладка «Паспорт» включает в себя сведения об образце: «Шифр», «Название», «Тип», «Дата отбора», «Место отбора», «Кем отобран», «Сырая масса, г» и «Описание».

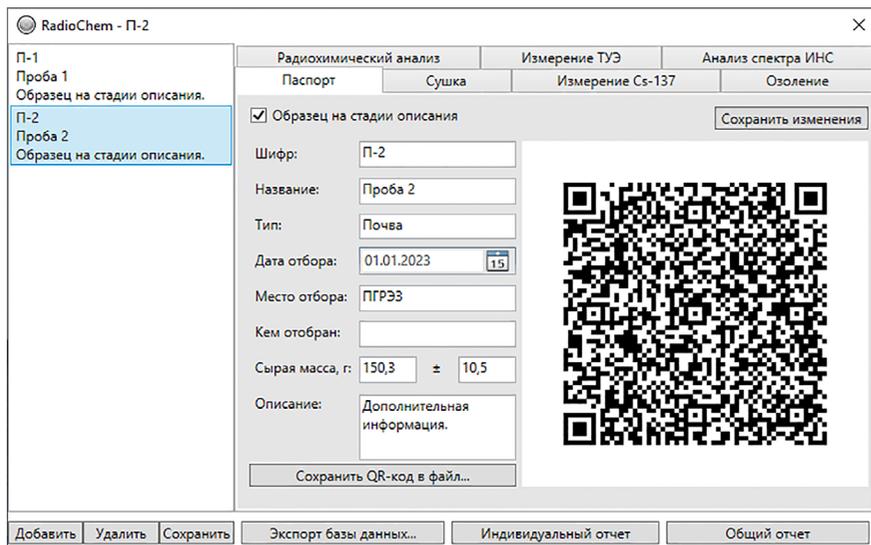


Рис. 3. Приложение RadioChem: интерфейс вкладки «Паспорт»

Заполнение и редактирование полей автоматически формирует и изменяет QR-код, который может быть сохранен отдельным файлом и распечатан на самоклеющейся бумаге для последующего прикрепления к таре, в которой хранится проба.

Вкладка «Сушка» содержит поля «Дата постановки», «Шифр тары», «Масса тары, г», «Масса тары с сырой пробой, г», «Масса тары с сухой пробой, г». Кнопка «Рассчитать» позволяет вычислить коэффициент усушки образца.

В высушенных почвенных и биологических пробах проводят измерение ^{137}Cs . Вкладка «Измерение Cs-137» содержит поля ввода «Дата измерения», «Масса сухой пробы, г», «Ауд. (Cs-137), Бк/кг» для трех повторностей, а также кнопку «Рассчитать» для определения среднего значения удельной активности ^{137}Cs в пробе и расширенной неопределенности измерения.

В поля ввода вкладки «Озоление» заносятся данные об этом этапе: «Дата постановки», «Шифр тигля», «Масса тигля, г», «Масса

тигля с сухой пробой, г», «Масса тигля с золой, г». С помощью кнопки «Рассчитать» вычисляется масса золы и коэффициент озоления.

Во вкладке «Радиохимический анализ» имеются поля «Дата постановки», «Масса навески золы, г», «ОРР» – для ввода названия образцового радиоактивного раствора, определяющего химический выход измеряемых элементов, «Активность, Бк» – активность на пробу, которую следует добавить перед проведением радиохимического анализа, «Объемная активность, Бк/мл» – объемная активность ОРР по паспорту. Кнопка «Рассчитать» позволяет вычислить объем добавляемого в золу ОРР необходимой активности. Также автоматически рассчитывается масса навески сухой пробы на основе данных о массе навески золы, взятой на анализ, и коэффициенте озоления, рассчитанном на предыдущем этапе.

Вкладка «Измерение ТУЭ» содержит поля ввода «Дата измерения», «Ауд. (Pu-238), Бк/кг», «Ауд. (Pu-239,240), Бк/кг», «Ауд. (Am-241), Бк/кг», «Ауд. (Метка), Бк/кг» для

трех повторностей. Кнопки «Рассчитать» помогают определить среднее значение удельной активности изотопов трансурановых элементов и расширенную неопределенность измерения.

Для проверки качества радиохимического анализа по данным спектров изотопов плутония и америция добавлена вкладка «Анализ спектра ИНС» (рис. 4).

Идентификация спектров α -излучения трансурановых элементов относится к задаче классификации и может быть решена без участия человека в автоматическом режиме при использовании ИНС.

Разработка искусственной нейронной сети, способной классифицировать спектры плутония и америция, проходила в несколько этапов.

Получение и отбор данных для анализа. Для обучения и проверки качества работы ИНС методом α -спектрометрии получены 375 реальных спектров α -излучения изотопов плутония и америция, содержащихся в травянистых, кустарничковых и древесных растениях, произрастающих на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

Предварительная подготовка данных. Измерение на детекторе производилось по 1024 каналам. Для повышения производительности проведено понижение размерности массива входных данных до 512. Начальным каналом выбран соответствующий энергии 4000 кэВ, конечным – 6555 кэВ. Шаг между каналами составил 5 кэВ. В данный диапазон попадают пики ^{241}Am (5,64 МэВ), ^{252}Cf (6,02 МэВ) – метка для определения радиохимического выхода америция, ^{238}Pu (5,49 МэВ), $^{239+240}\text{Pu}$ (5,15–5,16 МэВ), ^{242}Pu (4,89 МэВ) – для плутония.

Разработка архитектуры сети. Был выбран трехслойный перцептрон, состоящий из 512 входных нейронов, скрытого слоя из 8 нейронов и одного нейрона на выходном слое. Функции нейронов скрытого слоя логистические, активационная функция выходного нейрона многопеременная логистическая.

Обучение ИНС проводили методом обратного распространения ошибки в приложении STATISTICA 64 Trial версии 10. В качестве обучающей подвыборки случайным образом отобраны 70% спектров.

Тестирование и определение качества работы сети осуществляли на основе двух групп спектров: тестовой и контрольной, каждая из которых состояла из отобранных случайным образом 15% спектров.

Производительность (процент правильной классификации) составила: для обучающей подвыборки – 98,40%, для тестовой и контрольной – 98,21%. Наиболее точно классифицированы спектры α-излучения изотопов плу-

тония – 99,44%. По α-излучению ²⁴¹Am показатель был на высоком уровне – 97,45%.

Полученная нейронная сеть встроена в приложение RadioChem. При выборе файла спектра во вкладке «Анализ спектра ИНС» оно отображает спектрограмму и результат идентификации: плутоний или америций со значением коэффициента доверия. Чем ближе он к 1, тем с большей вероятностью спектр классифицирован правильно и, следовательно, тем качественнее проведен радиохимический анализ.

Веб-приложение BiotaDB для ведения базы данных доз облучения объектов биоты и первичной обработки результатов.

Данные, получаемые при определении содержания радионуклидов в почвенных и биологических образцах, необходимы для расчета доз облучения объектов биоты. При помощи веб-приложения BiotaDB авторизованный пользователь может создавать, хранить, редактировать, удалять информацию о проектах, в рамках которых проводятся исследо-

вания, площадках, где шел отбор образцов, пробах почвы и биологических, а также проводить расчеты коэффициентов накопления и перехода радионуклидов, мощности поглощенной дозы облучения от выбранного элемента и взвешенной, в том числе суммарной от нескольких изотопов.

После авторизации и создания проекта пользователь делает запись о пробной площадке, которая содержит сведения из базы данных EcoJournal: шифр пробной площадки, дату, описание, мощность эквивалентной дозы, пробы почвы и биологические с указанием шифра, даты отбора, коэффициента усушки, списка удельных активностей радионуклидов из приложения RadioChem.

При создании записей коэффициентов накопления и перехода программа автоматически сопоставляет данные по удельной активности (или плотности поверхностного загрязнения) конкретного радионуклида в биологической пробе и пробе почвы и рассчитывает коэффициент накопления (перехода). При формировании группы таких записей система определяет параметры описательной статистики: среднее арифметическое, минимальное и максимально значение, медиану, нижний и верхний квартили для каждого радионуклида по всем записям в группе.

Для расчета дозы внешнего и внутреннего облучения применяется модель МКРЗ на основе дозовых коэффициентов [9].

Мощность дозы внешнего облучения рассчитывается по формуле:

$$P_{ext}(N) = A_{soil\ sample}(N) \times DC_{ext} \quad (1)$$

где $P_{ext}(N)$ – мощность поглощенной дозы внешнего облучения от радионуклида N , мкГр·ч⁻¹;

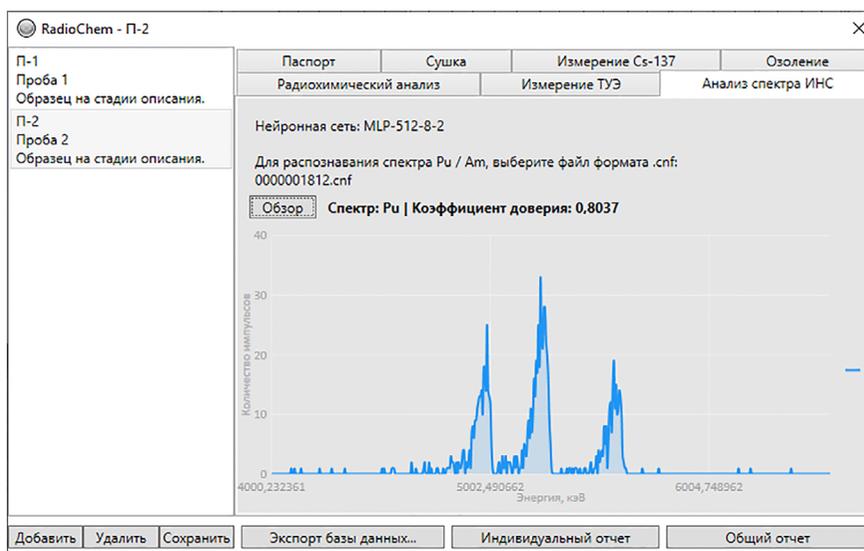


Рис. 4. Приложение RadioChem: интерфейс вкладки «Анализ спектра ИНС»

Мятлик луговой (Cs-137 + TУЭ)

Н - мощность взвешенной поглощенной дозы облучения [мкГр/ч]

Шифр пробы	Название	Вид	$\Sigma H(^{137}\text{Cs})$	$\Sigma H(^{241}\text{Am})$	$\Sigma H(^{238}\text{Pu})$	$\Sigma H(^{239+240}\text{Pu})$	ΣH	$\Sigma H(^{137}\text{Cs})$ %	$\Sigma H(^{241}\text{Am})$ %	$\Sigma H(^{238}\text{Pu})$ %	$\Sigma H(^{239+240}\text{Pu})$ %
1 бл-01	Надземная фитомасса	Мятлик луговой	2,99E-02	1,21E-01	1,22E-02	2,29E-02	1,86E-01	16,08	65,07	6,55	12,31
2 бл-02	Подземная фитомасса	Мятлик луговой	7,01E-02	1,74E-01	2,92E-02	5,50E-02	3,29E-01	21,34	53,04	8,90	16,72

Параметры

Среднее арифметическое	5,00E-02	1,48E-01	2,07E-02	3,89E-02	2,57E-01
Минимальное значение	2,99E-02	1,21E-01	1,22E-02	2,29E-02	1,86E-01
Максимальное значение	7,01E-02	1,74E-01	2,92E-02	5,50E-02	3,29E-01
Медиана	5,00E-02	1,48E-01	2,07E-02	3,89E-02	2,57E-01
Q1	2,99E-02	1,21E-01	1,22E-02	2,29E-02	1,86E-01
Q3	7,01E-02	1,74E-01	2,92E-02	5,50E-02	3,29E-01

Рис. 5. Веб-приложение BiotADB: интерфейс страницы групп записей доз облучения
Примечание: данные в таблице приведены для примера

$A_{soil\ sample}(N)$ – удельная активность радионуклида в верхнем 20-см слое почвы на пробной площадке, Бк/кг;

DC_{ext} – дозовый коэффициент для расчета мощности дозы внешнего облучения согласно [9], (мкГр/ч):(Бк/кг).

Для расчета мощности ОБЭ-взвешенных поглощенных доз внутреннего облучения от разных радионуклидов используется формула:

$$H_{int}(N) = A_{bio\ sample}(N) \times C_d \times DC_{int} \times (f_0 \times C_{RBE,0} + f_1 \times C_{RBE,1} + f_2 \times C_{RBE,2} + f_3 \times C_{RBE,3}), \quad (2)$$

где $H_{int}(N)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внутреннего облучения от радионуклида N , мкГр×ч⁻¹;

$A_{bio\ sample}(N)$ – удельная активность радионуклида N в биологической пробе, Бк/кг;

C_d – коэффициент усушки, для расчета удельной активности на сырую массу;

DC_{int} – дозовый коэффициент для расчета внутрен-

него облучения согласно [9], (мкГр×ч⁻¹):(Бк×кг⁻¹);

f_i – вклад i -го вида излучения, отн.ед.;

$C_{RBE,i}$ – коэффициент относительной биологической эффективности i -го вида излучения.

Согласно Публикации №136 МРКЗ рассматриваются следующие виды излучения: осколки деления (f_0 , $C_{RBE,0}=20$), α -частицы (f_1 , $C_{RBE,1}=10$), низкоэнергетическое β - и γ -излучение (f_2 , $C_{RBE,2}=3$), другое β - и γ -излучение (f_3 , $C_{RBE,3}=1$).

Поскольку внешнюю дозу облучения по модели МКРЗ формирует только γ -излучение с коэффициентом относительной биологической эффективности, равным 1, то суммарная мощность ОБЭ-взвешенной рассчитывается согласно формуле:

$$\Sigma H(N) = H_{int}(N) + P_{ext}(N), \quad (3)$$

где $\Sigma H(N)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внутреннего и внешнего облучения от радионуклида N , мкГр×ч⁻¹;

$H_{int}(N)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы вну-

треннего облучения от радионуклида N , мкГр×ч⁻¹;

$P_{ext}(N)$ – мощность поглощенной дозы внешнего облучения от радионуклида N , мкГр×ч⁻¹.

Мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения от всех радионуклидов рассчитывается по формуле:

$$\Sigma H = \Sigma H(N_1) + \Sigma H(N_2) + \dots + \Sigma H(N_n), \quad (4)$$

где ΣH – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от рассматриваемых радионуклидов, мкГр×ч⁻¹;

$\Sigma H(N_i)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от радионуклида N , мкГр×ч⁻¹.

Вклад отдельного изотопа в дозу облучения определяется, как доля ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы облучения данным изотопом от ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы всех радионуклидов:

$$d(N) = \Sigma H(N_i) : \Sigma H \times 100\% \quad (5)$$

где $d(N)$ – доля ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы радионуклида N от ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы рассматриваемых радионуклидов, %;

$\Sigma H(N_i)$ – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от радионуклида N , мкГр×ч⁻¹;

ΣH – мощность ОБЭ-взвешенной поглощенной дозы внешнего и внутреннего облучения от рассматриваемых радионуклидов, мкГр×ч⁻¹.

На рис. 5 представлен интерфейс страницы результатов расчета доз облучения и вклада каждого радионуклида в общую.

Как и для групп записей коэффициентов накопления и пере-

хода, для группы записей доз облучения также доступны параметры описательной статистики: среднее арифметическое, минимальное и максимальное значение, медиана, нижний и верхний квартили для каждого радионуклида и для суммарной дозы облучения от всех из них.

Веб-приложение доступно в виде сайта www.biotadb.by, справочная документация – на странице www.biotadb.by/home/help.

Использование программного комплекса в рамках грантов на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси №2016-29-140 и №2017-29-043 позволило создать

массив экспериментальных данных об удельной активности трансурановых элементов, коэффициентов их накопления и перехода, дозах облучения растений Полесского государственного радиационно-экологического заповедника с включением его в Государственный регистр информационных ресурсов (№5342336483). Полученная информация важна для принятия обоснованных решений по обеспечению радиационной защиты естественных экосистем в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС.

Заключение

Разработанный программный комплекс позволяет привести к единообразию расчет доз облучения техногенными радионуклидами объектов биоты. Преимущество данного комплекса заключаются в возможности работы на устройствах широко распространенных вычислительных платформ и простоте использования за счет интуитивно понятных интерфейсов входящих в него приложений. Разработка может быть использована как в образовательных, так и научных целях. ■

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов на выполнение научно-исследовательских работ докторантами, аспирантами и соискателями Национальной академии наук Беларуси №2016-29-140 на 2016 г. и №2017-29-043 на 2017 г.

■ **Summary.** The article describes software package for calculating the dose rate of ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, and ^{241}Am isotopes for non-human biota. It consists of three applications: a mobile application for describing sites and samples, desktop application for maintaining a database of samples for radiochemical analysis and measuring the activity of radionuclides, and a web application for calculating dose rates and descriptive statistics. An artificial neural network has been developed and trained to classify alpha radiation spectra, demonstrating its potential for assessing the quality of radiochemical analysis in determining the content of plutonium and americium isotopes. The advantages of the developed software include compatibility with devices of popular platforms, ease of use, and the unification of tasks for calculating dose rates for non-human biota.

■ **Keywords:** software, information technologies, dose rate, dosimetry, non-human biota, artificial neural networks.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-07-77-83>

Статья поступила в редакцию
30.11.2023 г.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Zheng M. The impact of digital economy on renewable energy development in China / M. Zheng, Ch. Y. Wong // *Innovation and Green Development*. 2024. Vol. 3, iss. 1. 100094. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.igd.2023.100094>.
- Investigating narratives and trends in digital agriculture: A scoping study of social and behavioural science studies / K. McGrath [et al.] // *Agricultural Systems*. 2023. Vol. 207. 103616. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2023.103616>.
- Medicine 2032: The future of cardiovascular disease prevention with machine learning and digital health technology / A. Javaid [et al.] // *American Journal of Preventive Cardiology*. 2022. Vol. 12. 100379. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ajpc.2022.100379>.
- Habib M. Digital transformation strategy for developing higher education in conflict-affected societies / M. Habib // *Social Sciences & Humanities Open*. 2023. Vol. 8, iss. 1. 100627. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssaho.2023.100627>.
- Rhodes D.V.L. Creating Custom Digital Assistants for the Scientific Laboratory using the HelixAI Platform / D.V.L. Rhodes, J. G. Rhodes // *SLAS Technology*. 2022. Vol. 27, iss. 5, P. 284–289. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.slast.2022.05.002>.
- Comparative of machine learning classification strategies for electron energy loss spectroscopy: Support vector machines and artificial neural networks / D. del-Pozo-Bueno [et al.] // *Ultramicroscopy*. Vol. 253. 113828. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2023.113828>.
- Artificial neural network for predicting nuclear power plant dynamic behaviors / M. El-Sefy [et al.] // *Nuclear Engineering and Technology*. 2021. Vol. 53, iss. 10. P. 3275–3285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.05.003>.
- Introducing a Virtual Assistant to the Lab: A Voice User Interface for the Intuitive Control of Laboratory Instruments / J. Austerjost [et al.] // *SLAS Technology*. Vol. 23, iss. 5. 2018. P. 476–482. DOI: <https://doi.org/10.1177/2472630318788040>.
- ICRP, 2017. Dose coefficients for nonhuman biota environmentally exposed to radiation. ICRP Publication 136. Ann. ICRP 46(2).
- Brown J.E. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals / J.E. Brown // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2016. Vol. 153. P. 141–148. DOI: [10.1016/j.jenvrad.2015.12.011](https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.011).
- МВИ объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами. МВИ. МН 3421-2010: утв. БелГИМ 28.05.10. Минск: БелГИМ, 2010.
- Методика определения активности стронция-90 и трансурановых элементов в биологических объектах: МВИ.МН 1892-2003. Введ. 2003-04-30. – Минск: ИРБ НАН Беларуси, 2003.
- Методика выполнения измерений мощности эквивалентной дозы гамма-излучения дозиметрами и дозиметрами-радиометрами: МВИ.МН 2513-2006. Введ. 2006-08-11. – Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2005.
- Ефремова Н.Ю. Оценка неопределенности в измерениях: Практическое пособие / Н.Ю. Ефремова. – Минск, 2003.