DOI: 10.21870/0131-3878-2018-27-4-65-75

УДК 504.054:621.039.76

Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов

Лаврентьева Г.В.^{1,2}, Мирзеабасов О.А.², Сынзыныс Б.И.², Гешель И.В.³

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга;

² ИАТЭ – филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск;

³ ФГБНУ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ), Обнинск

В настоящее время не отработан единый алгоритм оценки экологического риска, что определяет необходимость исследований в этой области. В данной работе приведена методология оценки радиационного экологического риска на экосистемном уровне, что является модификацией существующего подхода оценки риска на основе критических нагрузок для антропогенного загрязнения. Оценка риска состоит из пяти основных этапов: идентификация опасности, выявление референтных видов и показателей, определение и анализ критических нагрузок на основе построения зависимости «доза-эффект», оценка экологического риска и анализ функций риска, анализ неопределённостей. Экспериментальной площадкой является территория на севере Калужской области, подвергшаяся радиоактивному загрязнению в результате разгерметизации ёмкости хранилища радиоактивных отходов. На основании многолетних (2010-2015 гг.) мониторинговых работ определены входные параметры для оценки риска: реципиентом воздействия является наземная экосистема; при изучении химического и радиоактивного загрязнения территории выявлен фактор экологической опасности – ^{90}Sr ; определены ареал и площадь воздействия – 0,54 га, а также интенсивность нагрузки на реципиента воздействия; выявлены референтный вид – моллюск *Fruticicola fruticum* и референтные показатели – высота раковины и уровень белков металлотронеинов в мягких тканях моллюска; критические нагрузки для каждого показателя. При оценке экологического риска с учётом двух референтных показателей получены идентичные результаты, а именно радиационный экологический риск для наземной экосистемы, сопряжённой с территорией расположения хранилища радиоактивных отходов, является приемлемым.

Ключевые слова: критическая нагрузка, радиационный риск, референтный показатель, наземная экосистема, моллюск *Fruticicola fruticum*, высота раковины, белки металлотронеины, ^{90}Sr , функция риска, анализ неопределённостей.

Введение

Экологический риск в настоящее время признан одним из инструментов оценки состояния окружающей среды, в том числе и в рамках экологического нормирования. Следует отметить, что можно нормировать как содержание загрязняющих веществ в объектах окружающей среды, так и степень трансформации окружающей среды в результате загрязнения. В последнее время нормированию загрязняющих веществ не по их уровню содержания в объектах окружающей среды, а по реакции экосистемы на загрязнение посвящены многочисленные исследования [1-5]. В качестве регистрируемых показателей могут выступать наиболее чувствительные компоненты экосистемы, а уровень загрязнения, определяющий начало изменения показателя, рассматривается как критическая нагрузка.

Целью данной работы является оценка радиационного экологического риска на основе критических нагрузок для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов. Методология оценки риска на основе критических нагрузок загрязняющих веществ была

Лаврентьева Г.В.* – доцент, к.б.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Мирзеабасов О.А. – доцент, к.т.н.; Сынзыныс Б.И. – д.б.н., проф. ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Гешель И.В. – научн. сотр. ФГБНУ ВНИИРАЭ.

*Контакты: 248000, Калужская обл., Калуга, ул. Баженова, 2. Тел. +7 (4842) 77-45-05; e-mail: Lavrentyeva_G@list.ru.

разработана как механизм контроля атмотехногенного загрязнения [3, 6, 7]. При этом, разработка концепции критических нагрузок изначально была основана на принципах биогеохимии и предполагала наличие пороговой концентрации поллютанта, при достижении которого может проявляться его неблагоприятное действие на экосистемы. В данной работе источником загрязнения является хранилище радиоактивных отходов, потоком миграции – грунтовые воды и почва изучаемой территории, а приоритетными загрязнителями – радионуклиды, что является, с одной стороны, новшеством, с другой, – развитием методологии оценки экологических рисков на основании критических нагрузок.

Экспериментальной площадкой является территория в черте Калужской области, подвергшаяся радиоактивному загрязнению в 1998 г. в результате разгерметизации ёмкости хранилища радиоактивных отходов [8].

Материалы и методы

Для определения входных параметров при оценке экологического риска для наземной экосистемы был осуществлён пробоотбор почвы, наземного моллюска *Fruticicola fruticum* (устаревшая латынь – *Bradybaena fruticum*), крапивы двудомной (*Urtica dioica*). Пробы были отобраны на 42-х локальных контролируемых участках. Почва отбиралась посредством специализированного пробоотборника с набором ручных почвенных буров Эдельмана («Eijkelkamp», Нидерланды).

Пробоотбор моллюсков осуществлялся с растений и с почвы под растениями в количестве 25-30 особей с одного локального участка. С локального участка отбиралась вся биомасса крапивы. Для проведения исследований был выбран контрольный участок – 8b.

Измерение удельной активности с предварительным радиохимическим выделением ^{90}Sr в пробах почвы, воды, растительности, наземных моллюсках проводили на сцинтилляционном β -спектрометре «БЕТА-01С» по стандартной методике определения содержания ^{90}Sr по β -излучению его дочернего радионуклида ^{90}Y в объектах окружающей среды. Определение ^{137}Cs в образцах проводили методом γ -спектрометрии на γ -спектрометре Accuspec, Canberra Industries. Концентрация тяжёлых металлов определялась методом атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой (ICP AES Varian Liberty II). Определение удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs и концентрации тяжёлых металлов в каждой пробе осуществляли в трёхкратной повторности. Формы нахождения радионуклидов определялись методом последовательной экстракции. Оценку мощности поглощённой дозы для наземного моллюска осуществляли посредством метода Монте-Карло с использованием программы MCNP5 [9, 10]. Измерение морфометрических показателей (высота раковины, диаметр раковины) осуществляли с помощью бинокулярного микроскопа марки Motik BA 310 (Motic China Group Co. Ltd.). Уровень белков металлотioneинов (белков-MT) в тканях органов животных определялся радиохимическим методом, основанным на замещении ионов металла радиоактивным ^{109}Cd , хелатированных в MT.

Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью программы R. Применялись пакеты пространственного анализа, а также функция `nls()`, реализующая метод наименьших квадратов при параметризации нелинейных моделей. Функции риска строились с помощью построения функций распределения (функция `ecdf()` из R и методы пространственного анализа для оценки загрязнения).

Результаты и обсуждение

Предлагаемая методология оценки экологического риска на основе анализа критических нагрузок на экосистему состоит из пяти этапов: идентификация опасности, выявление референтных видов и показателей, определение и анализ критических нагрузок на основе построения зависимости «доза-эффект», оценка экологического риска и анализ функций риска, анализ неопределённостей.

1. Идентификация опасности

Данный этап оценки экологического риска направлен на определение экосистемы-реципиента, показателей воздействия на экосистему и оценку их величин. Для идентификации опасности на изучаемой территории рассматривались два возможных реципиента воздействия – водная и наземная экосистемы, в качестве показателей воздействия изучалось химическое загрязнение экосистем (K, Na, Ca, Mg, Sr, Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Co, Cd, Pb) и радиоактивное загрязнение (^{90}Sr , ^{137}Cs). Установлено, что химическое загрязнение не может рассматриваться с точки зрения показателя воздействия на экосистемы, т.к. не отмечается превышение ПДК изучаемых элементов [11]. Кроме того, суммарный показатель загрязнения почвы (<6) характеризует загрязнение как низкое. Анализ данных многолетнего (1998-2014 гг.) радиозэкологического мониторинга водных объектов (скважины, болото, ручей), подвергшихся радиоактивному загрязнению ^{137}Cs и ^{90}Sr , позволяет исключить водную экосистему изучаемой территории из потенциальных реципиентов воздействия [12]. Несколько иная ситуация наблюдается при анализе данных мониторинга радиоактивного загрязнения почвы территории расположения хранилища РАО. На территории отмечается локальное загрязнение ^{137}Cs , т.к. радионуклид обнаруживается в почве локальных участков 1, 1а, 1б. При этом удельная активность радионуклида составляет $44,3 \pm 13,2$ Бк/кг. Так же установлено, что ^{137}Cs находится в почве преимущественно (50-53%) в фиксированной форме нахождения, обменная форма составляет 8-9%, что ограничивает его латеральную и вертикальную миграцию в почве. Водорастворимая форма радионуклида составляет 27%, кислоторастворимая – 10-11%. Следовательно, ^{137}Cs можно не учитывать в качестве показателя воздействия при оценке экологического риска.

Однако на всей площади изучаемой территории обнаружено радиоактивное загрязнение почвы ^{90}Sr при варьировании его удельной активности от контрольного значения $19,7 \pm 11,1$ до 5203 ± 89 Бк/кг. При этом радионуклид находится в почве на 69-83% в своей обменной форме. Таким образом, при оценке экологического риска наземная экосистема является реципиентом воздействия, а в качестве фактора воздействия выступает радиоактивное загрязнение наземной экосистемы радионуклидом ^{90}Sr . При оценке экспозиции определён ареал распространения ^{90}Sr и площадь воздействия – 0,54 га.

2. Выявление референтных видов и показателей

Для оценки радиационного экологического риска предлагаем оперировать термином «референтный» показатель, обозначающий радиационно-индуцированный эффект у представителей биоты на уровне индивидуума, вида, популяции или экосистемы в целом, который может быть описан моделью, имеющей пороговое значение. В свою очередь, пороговое значение будет выступать в качестве критической нагрузки при оценке риска. Следует отметить, что многочисленные работы направлены на подтверждение постулата порогового действия на биоту с учётом детерминированных эффектов при развитии принципа радиационной защиты [13-16].

В период с 2010 по 2015 гг. проводилось экспериментальное и теоретическое изучение референтных видов и показателей для изучаемой территории. В качестве референтного вида обоснован наземный моллюск *Fruticicola fruticum*, референтного показателя – высота раковины моллюсков (при анализе показателей высоты и массы раковины моллюска, массы всего организма) и уровень белков-МТ, которые достоверно изменяются на увеличение дозовой нагрузки на организм [17]. Следует отметить, что моллюски давно признаны удобным объектом биоиндикации при загрязнении окружающей среды благодаря накопительной способности по отношению к тяжёлым металлам и радионуклидам, широкому ареалу распространения, простоте идентификации, короткому жизненному циклу [18-22].

3. Определение и анализ критических нагрузок на основе построения зависимостей «доза-эффект»

Для анализа критических радиационных нагрузок рассчитана мощность поглощённой дозы облучения наземного моллюска методом Монте-Карло, которая варьирует в диапазоне от $0,32 \pm 0,07$ до 76 ± 9 мГр/год. Исходными параметрами для оценки мощности дозы являются экспериментальные данные (интенсивность нагрузки на экосистему), отражающие удельную активность ^{90}Sr в компонентах экосистемы: в почве, растительности, раковинах моллюсков варьирует в диапазоне от $19,7 \pm 11,1$ до 5203 ± 89 Бк/кг; от $22,3 \pm 13,4$ до 10596 ± 195 Бк/кг; 76 ± 11 – 17640 ± 2646 Бк/кг соответственно.

Достоверное изменение ($p < 0,05$) высоты раковины моллюска от $0,8 \pm 0,1$ до $1,5 \pm 0,3$ см описывается уравнением вида $y = 0,5 + 0,06x e^{(-0,04x)}$ [17]. При этом мощность поглощённой дозы облучения 37 ± 6 мГр/год, превышение которой приводит к уменьшению высоты раковины, учитывается как критическая нагрузка для оценки экологического риска.

Анализ зависимости «доза-эффект» для уровня белков-МТ позволил выявить критическую нагрузку $42,3 \pm 5,8$ мГр/год, значение которой является пороговым значением подобранной кусочно-линейной модели вида $y = 19,3 + 1,12(x - 42,3)$, где 19,3 – постоянное значение до порога, 42,3 – пороговое значение мощности поглощённой дозы, 1,12 – коэффициент пропорциональности в области линейного отклика [17].

4. Оценка экологического риска по критическим нагрузкам и анализ функций риска

Оценка экологического риска осуществлялась посредством ГИС-технологий. Картирование изучаемой территории с отображением площади превышения критических нагрузок осуществлялось методом пространственной интерполяции. Приемлемой величиной для оценки экосистемного риска является показатель 95-процентной защищённости экосистемы: приемлемым считается такой риск, при котором площадь с превышением критических нагрузок не выше 5% от общей площади территории исследования [6].

Превышение критических нагрузок рассчитывалось как разница между мощностью поглощённой дозы облучения моллюска локального участка и величиной критической нагрузки. После вычисления превышений критических нагрузок для каждого локального участка посредством программы R определялась доля площади с превышением критических нагрузок. Графическое представление полученных результатов осуществлялось тоновой заливкой карты исследуемой территории и нанесением изолиний, отображающих превышение критических нагрузок.

Анализ картирования и расчёта превышения критических нагрузок показывает, что для исследуемой территории площадь, характеризующаяся превышением критической нагрузки для

высоты раковины моллюска, составляет 0,923%, что не превышает приемлемую величину 5% (рис. 1а). Таким образом, радиационный экологический риск для исследуемой наземной экосистемы характеризуется как приемлемый.

Рис. 1. Карта ГИС с превышением критических нагрузок: а) для высоты раковины моллюска, б) для уровня белков-МТ. Тоновая заливка отражает изменение мощности поглощённой дозы облучения моллюска.

Оценка радиационного экологического риска для наземной экосистемы с учётом показателя уровня белков-МТ в мягких телах моллюска также позволяет выявить приемлемость риска. При этом площадь исследуемой территории, характеризующая превышением соответствующей критической нагрузки, составляет 0,526% (рис. 1б).

Полученные значения площадей, характеризующих превышением критических нагрузок, позволяют перейти к определению вероятности развития негативных изменений в экосистеме на основании анализа функций риска. Функция риска является функцией распределения, которая характеризует долю площади с загрязнением меньшим, чем заданный уровень (критическая нагрузка). При этом риск можно оценить следующим образом:

$$Risk = 1 - F(x_{crit}),$$

где **Risk** – экологический риск; $F(x_{crit})$ – доля площади, которой соответствует критическая нагрузка. Таким образом, значение **Risk** интерпретируется как доля площади с превышением критической нагрузки.

Для графического представления функций риска были приняты следующие предположения. При значениях мощности поглощённой дозы меньших соответствующих критических нагрузок, вероятность превышения равна 0. При превышении уровня критической нагрузки вероятность превышения принимается за 1.

Красной линией на графиках, отображающих функцию риска, обозначено 95% площади исследуемой территории, пунктиром обозначено значение критической нагрузки (рис. 2).

Рис. 2. Функция риска для критической нагрузки а) на высоту раковины моллюска, б) на уровень белков-МТ.

Анализ функций риска подтверждает оценку радиационного экологического риска, проведенного посредством ГИС-технологий: риск является приемлемым при анализе критической нагрузки с учётом изученных референтных показателей (рис. 2а, 2б).

5. Анализ неопределённостей в оценке экологического риска

Выявление и анализ неопределённостей осуществляется для каждого этапа оценки экологического риска. Следует отметить, что неопределённости и их анализ для оценки риска были представлены в работе [23]. В данной работе можно отметить основные выявленные неопределённости. Для первого этапа оценки риска можно выявить следующие неопределённости: выбор реципиента воздействия, определение площади, подвергшейся загрязнению, выбор приоритетного загрязнителя экосистемы-реципиента. Следует отметить, что вышеуказанные неопределённости при учёте данных многолетнего мониторинга отличаются низким уровнем или исключаются. Неопределённости второго и третьего этапов оценки риска, включая наличие базы экспериментальных данных критериев для предлагаемого референтного вида, выбор приемлемого значения для сравнения полученных критических нагрузок при анализе зависимостей «доза-эффект», так же отличаются низким уровнем ввиду полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований. Четвёртый этап технологии оценки риска отличается самой высокой степенью неопределённости, которая заключается в переходе с видового на экосистемный уровень оценки.

Заключение

В настоящее время методы оценки радиационного экологического риска разработаны не в достаточной мере. Не существует единого алгоритма проведения оценки рисков на экосистемном уровне с учётом всех возможных неопределённостей, как, например, в случае оценки рисков при радиологической защите человека [24].

В данной работе проведена оценка радиационного экологического риска для наземной экосистемы, рассмотрена методология оценки риска на основе критических нагрузок.

Следует отметить, что получены идентичные результаты оценки риска при анализе двух референтных показателей – ростового показателя и показателя физиологического статуса наземного моллюска. Учитывая приемлемость радиационного экологического риска, можно заключить, что с точки зрения воздействия хранилища РАО на прилегающие экосистемы объект является безопасным, даже с учётом разгерметизации ёмкости, повлекшей радиоактивное загрязнение изучаемой территории.

Литература

1. **Башкин В.Н.** Экологические риски: определения и расчёты //Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11, № 5. С. 4-5.
2. **Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф.** Биоэкологические принципы мониторинга и нормирования загрязнения почв. Ростов-на-Дону: ЦВВР, 2001. 65 с.
3. **Демидова О.А.** Оценка экосистемного риска при экологическом обосновании строительства промышленных объектов //Экология и промышленность России. 2007. № 3. С. 50-52.
4. **Моисеенко Т.И.** Методология и методы определения критических нагрузок (применительно к поверхностным водам Кольской Субарктики) //Известия РАН. Серия географическая. 1999. № 5. С. 68-78.
5. **Овчинникова И.Н., Васильевская В.Д.** Оценка риска загрязнения почв на основе концепции критических нагрузок //Экологическая оценка и картографирование. 2003. № 6. С. 42-49.
6. **Башкин В.Н., Припутина И.В.** Биогеохимический анализ экологических рисков //Проблемы анализа риска. 2011. Т. 8, № 4. С. 8-21.
7. **Burns D.A., Blett T., Haeuber R., Pardo L.H.** Critical loads as a policy tool for protecting ecosystems from the effects of air pollutants //Front. Ecol. Environ. 2008. V. 6, N 3. P. 156-159.
8. **Ястребков А.Ю., Захарова Е.В., Каменский К.А.** Оценка воздействия приповерхностного хранилища радиоактивных отходов ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» на геологическую среду //Разведка и охрана недр. 2014. № 3. С. 56-62.
9. **Briesmeister J.F.** MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 4C, LA-13709-M. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2000. 790 p.
10. **X-5 Monte Carlo Team.** MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 5, Volume I: Overview and Theory. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2003.
11. **Лаврентьева Г.В., Бахвалов А.В., Сынзыныс Б.И., Муллаярова Р.Р.** Технология оценки экологического риска для сухопутной экосистемы в условиях хронического радиоактивного загрязнения //Проблемы анализа риска. 2012. Т. 9, № 5. С. 30-43.
12. **Лаврентьева Г.В., Силин И.И., Козьмин Г.В., Васильева А.Н., Сынзыныс Б.И., Глушков Ю.М., Момот О.А.** Сезонное изменение содержания ^{90}Sr в поверхностных и подземных водах района размещения хранилища радиоактивных отходов //Вода: химия и экология. 2012. № 12. С. 26-31.
13. **Крышев И.И., Рязанцев Е.П.** Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. Второе издание, переработанное и дополненное. М: Издат, 2010. 495 с.
14. **Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N.A., Copplestone D., Della Vedova C., Garnier-Laplace J., Howard B.J., Howe P., Oughton D.H., Wells C., Whitehouse P.** Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). Lancaster, 2008. 112 p.
15. **Sazykina T.G., Kryshev A.I., Sanina K.D.** Non-parametric estimation of thresholds for radiation effects in vertebrate species under chronic low-LET exposures //Radiat. Environ. Biophys. 2009. V. 48, N 4. P. 391-404.
16. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Радиационная безопасность окружающей среды: необходимость гармонизации российских и международных нормативно – методических документов с учётом требований федерального законодательства и новых международных основных норм безопасности ОНБ-2011 //Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 1. С. 47-61.
17. **Лаврентьева Г.В., Шошина Р.Р., Мирзеабасов О.А., Сынзыныс Б.И.** Оценка влияния ^{90}Sr на морфометрические показатели и уровень белков металлотронеинов в мягких тканях сухопутных моллюсков *Bradybaena fruticum* на биотопе регионального хранилища радиоактивных отходов //Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 4. С. 43-51.
18. **Хохуткин И.М.** О наследовании признака «опоясности» в естественных популяциях наземного брюхоногого моллюска *Bradybaena fruticum* (Mull.) //Генетика. 1979. Т. 15, № 5. С. 868-871.

19. **Majone F., Brunetti R., Gola I., Levis A.G.** Persistence of micronuclei in the marine mussel, *Mytilus galloprovincialis*, after treatment with mitomycin // *Mutat. Res.* 1987. V. 191, N 34. P. 157-161.
20. **Golubev A., Sikorski V., Stoliar O.** Ionizing radiation long-term impact on biota in water bodies with different levels radioactive contamination in Belarusian sector of Chernobyl nuclear accident zone // *Radioprotection*. 2011. V. 46, N 6. P. 393-399.
21. **Францевич Л.И., Паньков И.В., Ермаков А.А., Корнюшин А.В., Захарчук Т.Н.** Моллюски – индикаторы загрязнения среды радионуклидами // *Экология*. 1995. № 1. С. 57-62.
22. **Снегин Э.А.** Содержание химических элементов в раковинах наземных моллюсков в условиях влияния горно-обогатительных комбинатов // *Проблемы региональной экологии*. 2009. № 1. С. 22-27.
23. **Сынзыныс Б.И., Мирзеабасов О.А., Лаврентьева Г.В., Шошина Р.Р., Момот О.А.** Оценка радиационного экологического риска и её неопределённость для биоценоза регионального хранилища радиоактивных отходов // *Радиация и риск*. 2014. Т. 23, № 4. С. 43-54.
24. **Иванов В.К., Корело А.М., Панфилов А.П., Райков С.В., Чекин С.Ю., Кашеев В.В., Агапов А.М., Мурашко А.А., Калинина М.Ю., Максюттов М.А., Туманов К.А., Меняйло А.Н.** АРМИР: система оптимизации радиологической защиты персонала. М.: Издательство Перо, 2014. 302 с.

Radiation ecological risk for the terrestrial ecosystem in the zone close to the radioactive waste storage facility

Lavrentyeva G.V.^{1,2}, Mirzeabasov O.A.², Synzynys B.I.², Geshel I.V.³

¹ Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga;

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk;

³ All-Russian Scientific Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk

At present ecological risk is considered as one of the tools for assessment of the environment response on exposure to the harmful agents. Hazardous effect on the environment is estimated by the response of the most sensitive components of the environment. The lowest level of a pollutant content, at which environmental changes occur, is defined as a critical load. The article presents method for estimating radiation-associated ecological risk with the use of critical loads for terrestrial ecosystems in the area around the radioactive wastes storage site in the north part of the Kaluga oblast. The area was contaminated with radionuclides as a result of leakage of liquid radionuclide wastes from the storage facility. The method for risk assessment used in the study is a modified version of the existing approach to ecologic risk measuring with critical loads for atmotechnogenic pollution. Risk assessment consists of the following 5 stages: identification of harm; identification of reference species and determinants; determination and analysis of critical loads with the use of dose-response relationship; ecological risks assessment and risk functions analysis; analysis of uncertainties. Data of long-term (2010-2015) monitoring were used for determination of the listed input parameters for risk assessment: terrestrial ecosystem is the recipient; factor of ecological hazard, ⁹⁰Sr, was found due to investigation of chemical and radioactive contaminants; the area contaminated with radionuclides was determined, it was 0.54 hectares, intensity of radiation wastes impact on the recipient was determined; reference species, mollusk, *Fruticicola fruticum*, and reference determinants, such as its shell height, content of proteins, metallothioneins, in soft tissues of the mollusk, critical loads for every determinants. Values of ecological risk to the ecosystem – recipient assessed for 2 reference determinants, were similar, the risk was acceptable.

Key words: *critical load, radiation risk, reference determinant, terrestrial ecosystem, mollusk Fruticicola fruticum, mollusk shell size, metallothioneins, ⁹⁰Sr, risk function, uncertainties analysis.*

Lavrentyeva G.V.* – Associate Prof., C. Sc., Biol. BMSTU (KB), IATE MEPhI. Mirzeabasov O.A. – Associate Prof., C. Sc., Tech.; Synzynys B.I. – Prof., D. Sc., Biol. IATE MEPhI. Geshel I.V. – Researcher. RIRAE.

*Contacts: 2 Bazhenova str., Kaluga, Kaluga region, Russia, 248000. Tel. +7(4842) 77-45-05, e-mail: Lavrentyeva_G@list.ru.

References

1. **Bashkin V.N.** Ekologicheskiye riski: opredeleniya i raschety [Environmental risks: definitions and calculations]. *Problemy analiza riska – Issues of Risk Analysis*, 2014, vol. 11, no. 5, pp. 4-5.
2. **Kolesnikov S.I., Kazeyev K.Sh., Val'kov V.F.** Bioekologicheskiye printsipy monitoringa i normirovaniya zagryazneniya pochv [Bioecological principles of monitoring and regulation of soil contamination]. Rostov on the Don, TSVVR, 2001. 65 p.
3. **Demidova O.A.** Otsenka ekosistemnogo riska pri ekologicheskom obosnovanii stroitel'stva promyshlennykh ob'yektov [Assessment of ecosystem risk in the environmental justification of construction of industrial facilities]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii – Ecology and Industry of Russia*, 2007, no. 3, pp. 50-52.
4. **Moiseyenko T.I.** Metodologiya i metody opredeleniya kriticheskikh nagruzok (primeritel'no k poverkhnostnym vodam Kol'skoy Subarktiki) [Methodology and methods for determining critical loads (with reference to surface waters of the Kola Subarctic)]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya – Bulletin of RAS. Geography Series*, 1999, no. 5, pp. 68-78.
5. **Ovchinnikova I.N., Vasil'yevskaya V.D.** Otsenka riska zagryazneniya pochv na osnove kontseptsii kriticheskikh nagruzok [Assessment of soil contamination risk based on the concept of critical loads]. *Ekologicheskaya otsenka i kartografirovaniye – Environmental Assessment and Mapping*, 2003, no. 6, pp. 42-49.
6. **Bashkin V.N., Priputina I.V.** Biogeokhimicheskiy analiz ekologicheskikh riskov [Biogeochemical analysis of environmental risks]. *Problemy analiza riska – Issues of Risk Analysis*, 2011, vol. 8, no. 4, pp. 8-21.
7. **Burns D.A., Blett T., Haeuber R., Pardo L.H.** Critical loads as a policy tool for protecting ecosystems from the effects of air pollutants. *Front. Ecol. Environ.*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 156-159.
8. **Yastrebkov A.Yu., Zakharova E.V., Kamenskiy K.A.** Geological environment impact assessment of the near-surface radioactive waste storage facility of the IPPE. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2014, no. 3, pp. 56-62. (In Russian).
9. **Briesmeister J.F.** MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 4C, LA-13709-M. Los Alamos, Los Alamos National Laboratory, 2000. 790 p.
10. **X-5 Monte Carlo Team.** MCNP – A general Monte Carlo N-particle transport code. Version 5, Volume I: Overview and Theory. Los Alamos, Los Alamos National Laboratory, 2003.
11. **Lavrent'yeva G.V., Bakhvalov A.V., Synzynys B.I., Mullayarova R.R.** Tekhnologiya otsenki ekologicheskogo riska dlya sukhoputnoy ekosistemy v usloviyakh khronicheskogo radioaktivnogo zagryazneniya [Technology of environmental risk assessment for the terrestrial ecosystem in conditions of chronic radioactive contamination]. *Problemy analiza riska – Issues of Risk Analysis*, 2012, vol. 9, no. 5, pp. 30-43.
12. **Lavrent'yeva G.V., Silin I.I., Koz'min G.V., Vasil'yeva A.N., Synzynys B.I., Glushkov Yu.M., Momot O.A.** Dynamics of ^{90}Sr seasonal behaviour in surface and underground water near radioactive waste storage site. *Voda: khimiya i ekologiya – Water: Chemistry and Ecology*, 2012, no. 12, pp. 26-31. (In Russian).
13. **Kryshev I.I., Ryazantsev E.P.** Ekologicheskaya bezopasnost' yaderno-energeticheskogo kompleksa Rossii [Environmental safety of the nuclear power engineering complex of Russia]. Moscow, Izdat, 2010. 495 p.
14. **Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N. A., Copplestone D., Della Vedova C., Garnier-Laplace J., Howard B. J., Howe P., Oughton D.H., Wells C., Whitehouse P.** Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). Lancaster, 2008. 112 p.
15. **Sazykina T.G., Kryshev A.I., Sanina K.D.** Non-parametric estimation of thresholds for radiation effects in vertebrate species under chronic low-LET exposures. *Radiat. Environ. Biophys.*, 2009, vol. 48, no. 4, pp. 391-404.

16. **Kryshev I.I., Sazykina T.G.** Radiation safety of the environment: request for harmonization of Russian and international regulation documents with consideration of Federal laws and new International Basic Safety Standards. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2013, vol. 22, no. 1, pp. 47-61. (In Russian).
17. **Lavrent'yeva G.V., Shoshina R.R., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I.** Impact of ^{90}Sr on morphometric indices and metallothioneins level in the soft tissues of *Bradybaena fruticum* inhabiting the regional radioactive wastes storage facility. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2017, vol. 26, no. 4, pp. 43-51. (In Russian).
18. **Khokhutkin I.M.** O nasledovanii priznaka «opoyasonnosti» v estestvennykh populyatsiyakh nazemnogo bryukhonogogo mollyuska *Bradybaena fruticum* (Mull.) [On the inheritance of the sign of "opioasnosti" in the natural populations of the terrestrial gastropod *Bradybaena fruticum* (Mull.)]. *Genetika – Russian Journal of Genetics*, 1979, vol. 15, no. 5, pp. 868-871.
19. **Majone F., Brunetti R., Gola I., Levis A.G.** Persistence of micronuclei in the marine mussel, *Mytilus galloprovincialis*, after treatment with mitomycin. *Mutat. Res.*, 1987, vol. 191, no. 34, pp. 157-161.
20. **Golubev A., Sikorski V., Stoliar O.** Ionizing radiation long-term impact on biota in water bodies with different levels radioactive contamination in Belarusian sector of Chernobyl nuclear accident zone. *Radioprotection*, 2011, vol. 46, no. 6, pp. 393- 399.
21. **Frantsevich L.I., Pan'kov I.V., Ermakov A.A., Korniyushin A.V., Zakharchuk T.N.** Mollyuski – indikatory zagryazneniya sredy radionuklidamim [Molluscs are indicators of environmental pollution by radionuclides]. *Ekologiya – Russian Journal of Ecology*, 1995, no. 1, pp. 57-62.
22. **Snegin E.A.** Chemical element content in the terrestrial clam-shells under the impact of ore mining and processing enterprises. *Problemy regional'noy ekologii – Regional Environmental Issues*, 2009, no. 1, pp. 22-27. (In Russian).
23. **Synzynys B.I., Mirzeabasov O.A., Lavrent'yeva G.V., Shoshina R.R., Momot O.A.** Uncertainties in assessing radiation ecological risk for biocenosis of the regional radioactive waste storage. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2014, vol. 23, no. 4, pp. 43-54. (In Russian).
24. **Ivanov V.K., Korelo A.M., Panfilov A.P., Raykov S.V., Chekin S.YU., Kashcheyev V.V., Agapov A.M., Murashko A.A., Kalinina M.Yu., Maksyutov M.A., Tumanov K.A., Menyaylo A.N.** ARMIR: sistema optimizatsii radiologicheskoy zashchity personala [ARMIR: system for optimizing radiological protection of personnel]. Moscow, Pero, 2014. 302 p.