

Современные тенденции оценки радиационного экологического риска. Обзор

Лаврентьева Г.В.^{1,2}, Сынзыныс Б.И.²

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

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

Изучены современные методы оценки рисков при радиационном воздействии на биоту. Существующая система радиационной защиты биоты, включая и оценку радиационных экологических рисков, базируется на экоцентрическом принципе, который основан на концепции «условных (референтных) животных и растений». Современные методы оценки радиационных экологических рисков являются многоступенчатыми и научно обоснованными. Однако, на первых этапах оценки существующих подходов преобладают детерминистские методы, которые предполагают сравнение величин, установленных для оценки риска, с установленным дозовым пределом или единицей. Подобные оценки являются высококонсервативными ввиду отсутствия единого критерия безопасности биоты при радиационном воздействии. В рамках международных проектов установлены безопасные пределы облучения биоты, минимальные уровни которых колеблются в пределах 4-40 мкГр/ч. Альтернативным методом оценки, нивелирующим вышеуказанную неопределённость, может выступать метод оценки радиационного экологического риска по критическим нагрузкам. Критической нагрузкой является пороговое значение модели, описывающей радиационно-индуцированный эффект у представителей биоты на уровне индивидуума, вида, популяции или экосистемы в целом.

Ключевые слова: биота, экоцентрический подход, радиационный риск, референтный вид, референтный показатель, детерминистские методы, вероятностные методы, допустимые уровни облучения, критическая нагрузка, неопределённости оценки.

Введение

В настоящее время в качестве приоритетного механизма принятия решений в различных областях деятельности, в том числе и радиационной безопасности, рассматривается концепция оценки и менеджмента риска. В свою очередь, работы в области оценки риска для здоровья населения находят своё официальное отражение и законодательное закрепление. При этом методы оценки риска для здоровья человека достаточно хорошо проработаны и научно обоснованы.

В связи с всевозрастающей антропогенной нагрузкой на окружающую среду активное развитие получает направление, связанное с оценкой экологических рисков. В Федеральном законе РФ от 10.01.2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» экологический риск трактуется как «вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера» [1].

В отличие от оценки риска для человека при оценке экологических рисков не существует единой методологии. В связи с этим выполнение научных исследований в области оценки экологических рисков вызывает множество противоречий, включая терминологический аспект, подходы к оценке и анализу риска, интерпретацию полученных оценок. Следует отметить, что развитие системы оценки радиационного экологического риска также сдерживается отсутстви-

Лаврентьева Г.В.* – доцент, к.б.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Сынзыныс Б.И. – д.б.н., проф. ИАТЭ НИЯУ МИФИ.
*Контакты: 248000, Калужская обл., Калуга, ул. Баженова, 2. Тел.: +7 961 122 71 06; e-mail: Lavrentyeva_G@list.ru.

ем единых методологических подходов и недостатком научной информации о биологических эффектах в натуральных условиях.

Предметом данной работы является анализ современных методов оценки радиационных рисков для биоты и выявление наиболее проблемных аспектов при оценке риска.

1. Развитие экоцентрической концепции радиационной защиты

Длительное время при рассмотрении вопросов радиационной защиты господствующей являлась антропоцентрическая концепция, суть которой сформулирована в Публикации 26 МКРЗ [2] и отражена в Публикации 60 МКРЗ [3]. Антропоцентрическая парадигма предполагает защищённость биоты от радиационного фактора, если защищён человек. Однако необходимо учитывать, что существуют или могут складываться ситуации, при которых дозы облучения объектов биоты могут быть выше, чем дозы для человека в идентичных радиоэкологических условиях [4-8]. В связи с этим в настоящее время происходит смена парадигм: антропоцентрический принцип защиты окружающей среды от радиационного фактора воздействия предлагается заменить экоцентрическим [9, 10]. При этом антропоцентрический принцип является частью более общего экоцентрического принципа [11].

В рамках развития экоцентрического принципа радиационной защиты в последние десятилетия изучению воздействия радиационного фактора на биоту посвящены многочисленные международные проекты (EPIC, FASSET, EMRAS, EMRAS II, ERICA, PROTECT, STAR). Выполняемые проекты были направлены на:

- создание баз данных о радиационных эффектах на биоту;
- обоснование референтных видов для проведения радиобиологических и радиоэкологических исследований;
- разработку новых и усовершенствование существующих методов дозиметрии в рамках решения проблем радиационной защиты биоты;
- разработку методов оценки радиационного экологического риска;
- определение приоритетов в радиоэкологических исследованиях.

Следует отметить, что весомый вклад в развитие радиационной безопасности окружающей среды внесла работа МКРЗ. При этом в 2000 г. МКРЗ сформировала Рабочую группу для создания специальной программы в рамках развития концепции радиационной защиты окружающей среды. Результаты исследований Рабочей группы легли в основу Публикации 91 МКРЗ «Рамочная программа разработки системы оценки радиационных эффектов у представителей флоры и фауны, за исключением человека» [12]. В Публикации 91 предложена стратегия защиты представителей биоты, а также подчёркивается необходимость исключить расхождение подходов изучения воздействия радиационных факторов на биоту, предлагаемых разными странами.

Развитие программа, разрабатываемая Рабочей группой, получила в Публикации 108 МКРЗ «Защита окружающей среды: концепция и использование референтных животных и растений» [13], где был представлен раздел «Защита окружающей среды». В Публикации 108 МКРЗ предложена концепция RAPs – reference animals and plants, «условных (референтных) животных и растений». Также в Публикации приводятся требования к RAPs, к которым относятся [13]: достаточное количество радиобиологической информации по виду, в том числе данные о радиационных эффектах; пригодность вида для будущих радиобиологических исследований; типичность вида для конкретной экосистемы; широкая географическая изменчивость; биоакку-

муляция радионуклидов; продолжительный жизненный цикл для адекватной оценки общей дозы, мощности дозы, а также оценки зависимости «доза-эффект»; простая геометрия тела для моделирования воздействия радиации; возможность идентификации радиационных эффектов на организменном уровне. Следует отметить, что предложенный МКРЗ набор RAPs является достаточно дискуссионным с точки зрения различных радиозэкологических условий, разных климатических зон, доминирующих видов территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. При этом МКРЗ отмечает в Публикации 108, что предложенный набор не является окончательным и рекомендует обосновывать и другие виды, которые отвечают требованиям к RAPs. Также в Публикации 108 приводится метод расчёта коэффициентов пересчёта доз для RAPs; данные по радиационным эффектам и их применение для RAPs; особенности оценки эффектов в значениях референтных уровней, установленных с учётом соответствующих факторов; сравнение дозиметрических методов.

Дальнейшее развитие эоцентрического подхода МКРЗ представила в Публикации 114 [14], где проанализированы факторы накопления радионуклидов для RAPs и представлены значения коэффициентов накопления радионуклидов, которые необходимы при определении дозы облучения RAPs. Обобщение материалов Публикаций 108, 114 МКРЗ, которое предполагает разработку, апробацию и внедрение методов защиты окружающей среды при радиационном воздействии, приведено в Публикации 124 МКРЗ [15].

Следует отметить, что с учётом публикаций МКРЗ [13] и НКДАР ООН [16], а также монографии [17] можно представить более расширенный список референтных видов для оценки радиационного воздействия: наземное насекомое, пчела, травянистое растение, дерево (сосна), наземная улитка, дождевой червь, наземные амфибии (лягушка, уж), утка, наземные млекопитающие (мышь, олень/косуля), макроводоросли, рыба (пелагическая и бентическая), моллюски, водные млекопитающие. Также в 2014 г. опубликованы международные основные нормы безопасности [18], где отмечается необходимость подтверждать защиту окружающей среды от воздействия ионизирующего излучения.

Следует отметить, что концепция референтных организмов в системе радиационной защиты биоты может позволить оценить радиочувствительность экосистем в целом, что также отмечают авторы Публикации 108 МКРЗ [13]. В свою очередь, одним из современных и надёжных инструментов нормирования качества окружающей среды является оценка риска. При оценке экологического радиационного риска так же применяется концепция референтных организмов. Однако методы оценки в настоящее время не имеют общей канвы, недостаточно проработаны и не в полной мере научно обоснованы.

2. Методы оценки радиационного риска для биоты

В отличие от концепции радиационного риска для человека, которая предполагает стохастическое беспороговое действие ионизирующего излучения, экологический риск оценивается на основе порогового действия радиации [19, 20]. Оценка радиационного экологического риска предполагает переход от многочисленных параметров радиационной обстановки к интегральному показателю – уровню экологического риска, который характеризует качество окружающей среды [21].

Существующие методы оценки экологических рисков можно классифицировать на вероятностные, интегральные вероятностные и детерминистские [17]. Вероятностные методы осно-

ваны на использовании распределения характеристики фактора воздействия на биоту. Оценка влияния радиационного фактора на биологический объект проводится посредством распределения поглощённой дозы облучения живого организма. При этом оценивается вероятность превышения порога воздействия и проявления радиобиологического эффекта. Либо в рамках интегральных вероятностных методов при постоянной дозовой нагрузке (доза может быть и меньше дозового предела) проводится оценка вероятности возникновения радиобиологического эффекта.

Наиболее распространённым в настоящее время является детерминистский метод, отличающийся простотой выполнения и предусматривающий оценку показателя, который определяется как отношение дозовой нагрузки на представителя биоты к величине критерия риска. Однако при реализации таких методов, как правило, не проводится учёт неопределённостей, в связи с чем отмечается низкая точность оценки риска.

Следует отметить, что для оценки радиэкологического состояния окружающей среды, в том числе и с применением методов оценки риска, всё больше внедряется многоуровневая поэтапная структура мониторинга. Однако в основе таких общепринятых методов уже на первых этапах оценки реализуются детерминистские методы, которые отличаются «грубостью» полученных оценок.

Например, подобный метод применяется в разработанном Департаментом энергетики США руководстве для оценки воздействия радиационно-опасных объектов на окружающую среду [22]. Оценка риска базируется на величине SOF (sum of fractions) и определяется по выражению (1):

$$SOF = \sum_{ij} \frac{C_{ij}}{BCG_{ij}}, \quad (1)$$

где C_{ij} – максимально измеренные активности i -го радионуклида в j -ом природном компоненте; BCG_{ij} – соответствующие предельные значения (Biota Concentration Guide), которые получают с учётом значений «предельных доз» для изучаемых видов живых организмов. При этом необходимость перехода к следующему этапу оценки, т.е. детальным исследованиям, осуществляется, если SOF превышает единицу. Следует отметить, что в последнее время такой подход при оценке радиационных экологических рисков подвергается критике, т.к. сравнение величины, полученной для оценки риска, с единицей по сути является детерминистским подходом и противоречит интерпретации риска как меры величины и вероятности возникновения негативных последствий. Кроме того, при реализации такого подхода невозможен учёт возможных вариантов превышения единицы, т.е. насколько значение SOF должно превышать единицу – на незначительную величину или несколько порядков, чтобы можно было утверждать о защищённости биоты [11, 23-25].

При оценке радиационного экологического риска посредством метода, предложенного МКРЗ [13], осуществляется оценка безразмерного коэффициента опасности, который определяется следующим образом (2):

$$R_j = \frac{D_j}{RD}, \quad (2)$$

где D_j – мощность дозы облучения j -го референтного объекта биоты, Гр/сут; RD – контрольный уровень экологически безопасного облучения организмов биоты, Гр/сут. Эта оценка также является консервативной ввиду отсутствия единого критерия безопасности биоты при радиационном воздействии.

Высококонсервативными можно считать оценки радиационных экологических рисков с применением общепринятого «Интегрированного подхода к оценке и управлению рисками для природной среды, возникающими при воздействии ионизирующей радиации» [26] (далее по тексту «Интегрированный подход»). Этот подход сочетает применение детерминистских и вероятностных методов при оценке радиационных рисков, сопровождается внедрением программного обеспечения ERICA Tool, а также базами данных по миграционным параметрам радионуклидов, по дозиметрическим характеристикам и радиобиологическим эффектам у референтных видов биоты. Оценка радиационной безопасности в рамках первого этапа представляет собой сумму парциальных рисков (RQ) превышения установленных предельных уровней (EMLC) для каждого радионуклида. В свою очередь EMLC рассчитывается с учётом превышения допустимого уровня радиационного воздействия на референтный организм. В данном методе также применяется анализ сложившейся радиоэкологической обстановки на основании сравнения RQ с единицей. Однако программное обеспечение позволяет принимать решения о дополнительных исследованиях, если полученное значение близко к единице (в отличие от метода, предложенного Департаментом энергетики США). Несомненно, «Интегрированный подход» является наиболее разработанным многоуровневым методом оценки радиационных экологических рисков, позволяет провести расчёт доз внутреннего и внешнего облучения для референтных видов, даёт возможность самостоятельной корректировки параметров для расчёта (физико-химические параметры среды, коэффициенты распределения радионуклидов, геометрия референтного организма), предусматривает анализ неопределённостей оценки мощностей доз облучения и значений полученных RQ. Также на крайнем этапе оценки «Интегрированный подход» предусматривает использование вероятностного метода оценки, в частности метода Монте-Карло. Однако при многоуровневой оценке радиационной обстановки на изучаемой территории данный подход даёт возможность учёта содержания радионуклидов только в воде, почве, воздухе и донных отложениях. Это является одним из недостатков этого подхода, т.к. в большинстве случаев, например, для наземной биоты необходимо учитывать содержание радионуклидов в растительности. Также невозможен учёт удельной активности инкорпорированных радионуклидов животными. Следует отметить, что оцененные посредством программного обеспечения ERICA Tool удельные активности в организме референтного вида часто не согласуются с измеренными значениями [11], что может приводить к дальнейшим ошибочным оценкам радиационного риска.

Следует отметить, что каждый применяемый в настоящее время метод оценки радиационного экологического риска основан на применении допустимого уровня радиационного облучения биоты. Несмотря на стремительное развитие методов оценки радиационного воздействия на биоту до сих пор нет единого общепринятого критерия безопасности для представителей флоры и фауны. Отсутствие единых критериев является неопределённостью в оценке радиационного экологического риска, которая делает существующие методы оценки высококонсервативными.

В рамках проекта ERICA и PROTECT и рекомендован безопасный предел 10 мкГр/ч (0,24 мГр/сут), который предназначен для всех групп организмов [13, 19]. МКРЗ в Публикации 108 [13] дифференцирует представителей биоты и рекомендует следующие безопасные уровни воздействия ионизирующего излучения: для млекопитающих, позвоночных животных и сосны

обыкновенной – 0,1-1,0 мГр/сут, а для растений и беспозвоночных животных – 1-10 мГр/сут, с учётом коэффициента запаса 10. Ранее был предложен подобный подход комиссией по ядерной безопасности Канады [27]: для беспозвоночных животных критический уровень хронического радиационного воздействия составляет 2 Гр/год, для млекопитающих, водорослей, высших водных и наземных растений – 1 Гр/год; для рыб – 0,2 Гр/год. Министерство энергетики США предложило [23]: для водных животных и наземных растений дозовым пределом является 10 мГр/сут, а для наземных животных – 1 мГр/сут. Шкала дозовых нагрузок на биоту, при которых возможно проявление радиационных эффектов в природных популяциях, разработана Г.Г. Поликарповым и включает 6 зон в зависимости от мощности дозы облучения от <0,01 мГр/год до >>МГр/год [28]. И.И. Крышевым и Т.Г. Сазыкиной на основании более 400 научных публикаций составлена шкала проявления радиационных эффектов в зависимости от уровня хронического облучения в диапазоне от 10^{-6} до более 1 Гр/сут [21]. В работе [19] приведена сводная таблица уровней облучения, рекомендуемых МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН, CNSC, ERICA, для ограничения радиационного воздействия на представителей наземных и водных экосистем. При анализе рекомендуемых международными организациями безопасных пределов облучения биоты можно заключить, что минимальные уровни колеблются в пределах 4-40 мкГр/ч.

Альтернативным методом оценки радиационного экологического риска, реализация которого в качестве критерия безопасности учитывает радиационно-индуцированное изменение показателя жизнедеятельности представителя биоты, является метод оценки риска по критическим нагрузкам [29, 30]. Метод включает классические этапы, рекомендованные международными организациями и научным сообществом, деятельность которых направлена на разработку методов оценки экологических рисков. При этом выделяются следующие этапы при оценке риска: идентификация опасности; выявление референтных видов и показателей; определение и анализ критических нагрузок на основе построения зависимостей «доза-эффект» в градиенте нагрузки; оценка экологического риска по критическим нагрузкам и анализ функций риска; анализ неопределённостей в оценке экологического риска. Для оценки риска необходимо экспериментальным путём выявить «референтный» показатель – 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 выступает в качестве критической нагрузки при оценке риска. Таким образом, этот метод исключает неопределённости при оценке риска, связанные с принятием величины допустимого уровня облучения для биоты. Кроме того, оценка экологического радиационного риска по критическим нагрузкам основана на вероятностном методе [29, 30], что делает полученные оценки более точными, нежели при детерминистском подходе.

Заключение

Развитие системы оценки радиационного экологического риска сдерживается отсутствием единых методологических подходов. В настоящее время существует достаточно много проблемных аспектов, возникающих при оценке радиационных рисков для биоты.

Рекомендованный МКРЗ набор «референтных животных и растений» для оценки радиационного воздействия на биоту является дискуссионным, ввиду чего необходимо обоснование

и других видов, применение которых приведёт к более точным оценкам в конкретных радиоэкологических, климатических, геоморфологических и других условиях. Выбор показателей для оценки радиационного воздействия на биоту также находится в стадии становления.

Общепринятые многоступенчатые методы оценки экологических рисков на первых этапах оценки в основном предполагают детерминистские, а не вероятностные подходы оценки, включая ранговые оценки, сравнение с установленной критической величиной или единицей. Данные подходы могут привести к ошибочной оценке риска, т.к. ранговая оценка приводит к потерям информации на границах рангов, методы сравнения с критическими значениями (или единицей) не предусматривают даже размерность превышения этих значений (т.е. превышение должно быть на незначительные величины или на несколько порядков) для утверждения защищённости/незащищённости биоты.

Альтернативой для нивелирования неопределённостей, связанных с применением детерминистских подходов при оценке радиационных экологических рисков, может являться метод оценки риска по критическим нагрузкам.

Литература

1. ФЗ № 7. Об охране окружающей среды: принят Государственной Думой 20.12.2001 г., ред. от 31.12.2017. М., 2002. 47 с.
2. ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26 //Ann. ICRP. 1977. V. 1, N 3. P. 1-53.
3. ICRP, 1991. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60 //Ann. ICRP. 1991. V. 21, N 1-3. P. 1-201.
4. **Алексахин Р.М.** Проблемы радиозологии: Эволюция идей. Итоги. М.: РАСХН, 2006. 880 с.
5. **Алексахин Р.М.** Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоиздат, 1982. 216 с.
6. **Романов Г.Н., Спирин Д.А.** Воздействие ионизирующих излучений на живую природу при уровнях, предусмотренных современными нормами радиационной безопасности //Доклады АН СССР. 1991. Т. 318. С. 248-251.
7. **Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A., Sanzharova N.I., Spirin Y.V., Spiridonov S.I., Gontarenko I.A., Strand P.** Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant //J. Environ. Radioact. 2005. V. 80, N 1. P. 1-25.
8. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Радиационная безопасность биосферы: научные и нормативно-методические аспекты //Радиозологические чтения, посвящённые действительному члену ВАСХНИЛ В.М. Клечковскому: сб. трудов. Обнинск: ГНУ ВНИИСХРАЭ, 2014. С. 31-76.
9. **Pentreath P.J.** A system for radiological protection of the environment: some thoughts and ideas //J. Radiol. Protect. 1999. V. 19, N 2. P. 117-128.
10. **Алексахин Р.М.** Радиозология и проблемы радиационной безопасности //Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2006. Т. 51, № 1. С. 28-32.
11. **Удалова А.А., Гераськин С.А., Алексахин Р.М., Киселев С.М.** Современные подходы к оценке радиационного воздействия на окружающую среду //Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2013. Т. 58, № 4. С. 23-33.
12. ICRP, 2003. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species. ICRP Publication 91 //Ann. ICRP. 2003. V. 33, N 3. P. 1-79.
13. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108 //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. P. 1-251.
14. ICRP, 2009. Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114 //Ann. ICRP. 2009. V. 39, N 6. P. 1-111.
15. ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP Publication 124 //Ann. ICRP. 2014. V. 43, N 1. P. 1-59.
16. Effects of radiation on the environment. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York: United Nations, 2011.
17. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту /под общ. ред. И.И. Линге, И.И. Крышева. М., 2015. 265 с.
18. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 458 p.
19. **Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N.A., Coplestone D.** Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R). 2008. 112 p.
20. **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.

21. **Крышев И.И., Сазыкина Т.Г.** Радиационная безопасность окружающей среды. Обзор //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 3. С. 113-131.
22. U.S. DOE-STD-1153-2002. A graded approach for evaluation radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Washington: US Department of energy, 2002. 234 p.
23. **Crane M., Grosso A., Whitehouse P., Forrow D.** Risk characterization in direct toxicity assessment of the River Esk and the Tees Estuary //Ecotoxicology. 2004. V. 13, N 5. P. 463-474.
24. **Sander P., Bergback B., Oberg T.** Uncertain numbers and uncertainty in the selection of input distribution: consequences for a probabilistic risk assessment of contaminated land //Risk Anal. 2006. V. 26, N 5. P. 1363-1375.
25. **Morris R.C.** Applying DOE's Graded Approach for assessing radiation impacts to non-human biota at the INL //J. Environ. Radioact. 2006. V. 87, N 1. P. 77-100.
26. **Howard B.J., Larsson C.M.** The ERICA Integrated Approach and its contribution to protection of the environment from ionizing radiation //J. Environ. Radioact. 2008. V. 99, N 9. P. 1361-1363.
27. CEPA. Canadian Environmental Protection. Act. Priority substances list assessments report. Release of radionuclides from nuclear facilities (impact on non-human biota). Environment Canada, 1999. 130 p.
28. **Поликарпов Г.Г.** Радиационная защита биосферы, включая Homo Sapiens: выбор принципов и поиски решения //Морской экологический журнал. 2006. Т. 5, № 1. С. 16-34.
29. **Лаврентьева Г.В., Мирзеабасов О.А., Сынзыныс Б.И., Гешель И.В.** Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 4. С. 65-75.
30. **Lavrentyeva G.V., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I.** Ecological risk assessment for the terrestrial ecosystem under chronic radioactive pollution //Int. J. Environ. Res. 2014. V. 8, N 4. P. 961-970.

Current trends in the assessment of radiation environmental risk. Review

Lavrentyeva G.V.^{1,2}, Synzynys B.I.²

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

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk

This article presents analysis of modern methods to estimate radiation associated risk for biota. The current system of radiation protection of non-human species which includes the assessment of radiation environmental risks develops within the scope of the ecocentric approach, based on the concept of "reference animals and plants". Current approaches to estimating radioecological risks are science-based multi-stage process. In the early assessment stages deterministic models are mostly used to compare estimated risk values and estimated dose limits. Due to the absence of uniform approach to estimating radiation impact on biota safety following radiation exposure, the estimates are very conservative. The outputs of international research projects are quantified safe exposure limits for biota varying between 4 and 40 $\mu\text{Gy}/\text{hour}$. Estimating radiation environmental risk on the basis of critical loads can be an alternative approach, that allows minimization of the rigidity. A critical load is the threshold value of a model describing the radiation-induced effect on biota subjects at individual, species, population, or ecosystem level as a whole.

Key words: *biota, ecocentric approach, radiation risk, reference animals and plants, reference indicator, deterministic methods, probabilistic methods, no-effect radiation levels, critical load, uncertainties of estimation.*

References

1. FZ N 7. Ob okhrane okruzhayushchey sredy [Federal Law no. 7. On environmental protection]. Moscow, 2002. 47 p.
2. ICRP, 1977. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 26. *Ann. ICRP*, 1977, vol. 1, no. 3, pp. 1-53.
3. ICRP, 1991. The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. *Ann. ICRP*, 1991, vol. 21, no. 1-3, pp. 1-201.
4. **Aleksakhin R.M.** Problemy radioekologii: Evolyutsiya idey. Itogi [Problems of radioecology: the evolution of ideas. The results]. Moscow, RAAS, 2006. 880 p.
5. **Aleksakhin R.M.** Yadernaya energiya i biosfera [Nuclear energy and biosphere]. Moscow, Energoizdat, 1982. 216 p.
6. **Romanov G.N., Spirin D.A.** Vozdeystviye ioniziruyushchikh izlucheniye na zhivuyu prirodu pri urovnyakh, predusmotrennykh sovremennymi normami radiatsionnoy bezopasnosti [Effects of ionizing radiation on the living environment at levels provided by modern radiation safety standards]. *Doklady AN SSSR – Reports of Academy of Sciences of the USSR*, 1991, vol. 318, pp. 248-251.
7. **Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geras'kin S.A., Sanzharova N.I., Spirin Y.V., Spiridonov S.I., Gontarenko I.A., Strand P.** Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. *J. Environ. Radioact.*, 2005, vol. 80, no. 1, pp. 1-25.
8. **Kryshch I.I., Sazykina T.G.** Radiatsionnaya bezopasnost' biosfery: nauchnyye i normativno-metodicheskiye aspekty [Radiation safety of the biosphere: scientific and regulatory aspects]. Radioekologicheskiye chteniya, posvyashchennyye deystvitel'nomu chлену VASKHNIL V.M. Klechkovskomu: sb. trudov. [Radioecological readings dedicated to the real member of VASHNIL V.M. Klechkovsky: a collection of works]. Obninsk, RIRAE, 2014, pp. 31-76.
9. **Pentreath P.J.** A system for radiological protection of the environment: some thoughts and ideas. *J. Radiol. Protect.*, 1999, vol. 19, no. 2, pp. 117-128.
10. **Alexakhin R.M.** Radioecology and problems of radiation safety. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' – Medical Radiology and Radiation Safety*, 2006, vol. 51, no. 1, pp. 28-32. (In Russian).
11. **Oudalova A.A., Geras'kin S.A., Alexakhin R.M., Kiselev S.M.** Current approach to environment radiation impact assessment. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' – Medical Radiology and Radiation Safety*, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 23-33. (In Russian).
12. ICRP, 2003. A framework for assessing the impact of ionizing radiation on non-human species. ICRP Publication 91. *Ann. ICRP*, 2003, vol. 33, no. 3, pp. 1-79.
13. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 4-6, pp. 1-251.
14. ICRP, 2009. Environmental protection: transfer parameters for reference animals and plants. ICRP Publication 114. *Ann. ICRP*, 2009, vol. 39, no. 6, pp. 1-111 p.
15. ICRP, 2014. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP Publication 124. *Ann. ICRP*, 2014, vol. 43, no. 1, pp. 1-59.
16. Effects of radiation on the environment. UNSCEAR 2008. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Volume II, Scientific Annex E. Effect of ionizing radiation on non-human biota. New York, United Nations, 2011.
17. *Prakticheskiye rekomendatsii po voprosam otsenki radiatsionnogo vozdeystviya na cheloveka i biotu [Practical recommendations for assessing radiation effects on humans and biota]*. Eds.: I.I. Linge, I.I. Kryshch. Moscow, 2015. 265 p.
18. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. No GSR Part 3. Vienna, IAEA, 2014. 458 p.

19. **Andersson P., Beaugelin-Seiller K., Beresford N.A., Coppelstone D.** Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations. PROTECT Deliverable 5. EC contract number: 036425 (FI6R), 2008. 112 p.
20. **Kryshch 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).
21. **Kryshch I.I., Sazykina T.G.** Radiation protection of the natural environment. Review. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 113-131. (In Russian).
22. U.S. DOE-STD-1153-2002. A graded approach for evaluation radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Washington, US Department of energy, 2002. 234 p.
23. **Crane M., Grosso A., Whitehouse P., Forrow D.** Risk characterization in direct toxicity assessment of the River Esk and the Tees Estuary. *Ecotoxicology*, 2004, vol. 13, no. 5, pp. 463-474.
24. **Sander P., Bergback B., Oberg T.** Uncertain numbers and uncertainty in the selection of input distribution: consequences for a probabilistic risk assessment of contaminated land. *Risk Anal.*, 2006, vol. 26, no. 5, pp. 1363-1375.
25. **Morris R.C.** Applying DOE's Graded Approach for assessing radiation impacts to non-human biota at the INL. *J. Environ. Radioact.*, 2006, vol. 87, no. 1, pp. 77-100.
26. **Howard B.J., Larsson C.M.** The ERICA Integrated Approach and its contribution to protection of the environment from ionizing radiation. *J. Environ. Radioact.*, 2008, vol. 99, no. 9, pp. 1361-1363.
27. CEPA. Canadian Environmental Protection. Act. Priority substances list assessments report. Release of radionuclides from nuclear facilities (impact on non-human biota). Environment Canada, 1999. 130 p.
28. **Polikarpov G.G.** Radiatsionnaya zashchita biosfery, vklyuchaya Homo Sapiens: vybor printsipov i poiski resheniya [Radiation protection of the biosphere, including Homo Sapiens: choosing principles and finding a solution]. *Morskoy ekologicheskiy zhurnal – Marine Ecological Journal*, 2006, vol. 5, no. 1, pp. 16-34.
29. **Lavrentyeva G.V., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I., Geshel I.V.** Radiation ecological risk for the terrestrial ecosystem in the zone close to the radioactive waste storage facility. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 4, pp. 65-75. (In Russian).
30. **Lavrentyeva G.V., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I.** Ecological risk assessment for the terrestrial ecosystem under chronic radioactive pollution. *Int. J. Environ. Res.*, 2014, vol. 8, no. 4, pp. 961-970.