Критерии реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий размещения объектов использования атомной энергии

Крышев И.И., Крышев А.И., Панченко С.В.¹, Ведерникова М.В.¹

ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета, Обнинск;

¹ ИБРАЭ РАН, Москва

Представлены методы получения операционных критериев (уровней) реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий размещения объектов использования атомной энергии с учётом современных экологических и радиационно-гигиенических требований. Выполнены модельные расчёты контрольных уровней содержания радионуклидов в почве по критериям ограничения облучения человека и объектов биоты. Произведено сравнение полученных операционных уровней экологических и радиационно-гигиенических критериев реабилитации загрязнённых участков территории для ряда радионуклидов с предельными значениями удельной активности (ПЗУА) отнесения их к твёрдым радиоактивным отходам. Показано, что в рассмотренных случаях в качестве лимитирующего фактора могут выступать все три критерия. Более жёсткие значения контрольных уровней по экологическому критерию получены для таких радионуклидов как ^{90}Sr , ^{99}Tc . Для изотопов естественного происхождения: ^{232}Th , ^{238}U и большинства трансурановых элементов в качестве основного критерия могут выступать ПЗУА. Для большинства γ -излучающих изотопов (^{60}Co , ^{137}Cs и др.) лимитирующим будет радиационно-гигиенический критерий. Относительно высокая значимость экологического критерия реабилитации загрязнённой радионуклидами территории обусловлена тем, что, несмотря на значительно более высокие уровни экологически безопасного облучения для объектов живой природы по сравнению с человеком, объекты биоты подвергаются практически по всем путям облучения на этой территории и, соответственно, получают более высокие дозовые нагрузки. Люди, находясь на территории объекта использования атомной энергии, не связаны с ней пищевыми цепочками. Единственными путями облучения от γ -излучающих радионуклидов для человека на загрязнённой территории промплощадки являются внешнее облучение от земной поверхности и вдыхание воздуха, а для β - и α -излучающих радионуклидов – только ингаляция атмосферного воздуха. Полученные результаты показывают, что при разработке критериев реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий необходимо использовать как экологические, так и радиационно-гигиенические требования. Проблемным вопросом, требующим нормативного разъяснения, остаётся использование в ряде случаев значений ПЗУА при решении вопросов о необходимости реабилитации промышленных площадок.

Ключевые слова: реабилитация, экологический критерий, радиационно-гигиенический критерий, объект использования атомной энергии, доза, радионуклиды, окружающая среда, почва, контрольный уровень, биота.

Введение

Основной целью реабилитации радиоактивно загрязнённой территории размещения объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) является снижение радиологической опасности для человека и окружающей среды до уровня приемлемого радиационного и экологического риска. Большинство территорий ОИАЭ даже после вывода из эксплуатации отдельных объектов будет использоваться в промышленных целях. При проведении работ по перепрофилированию использования территорий возникает задача определения существующих рисков вредного воздействия на персонал и соотнесения их с нормативными установленными величинами. В случае несоответствия существующих рисков современным требованиям обеспечения безопасности возникает необходимость разработки плана реабилитационных работ промышленной

Крышев И.И.* – гл. научн. сотр., д.ф.-м.н., проф.; Крышев А.И. – зав. лаб., д.б.н. ФГБУ «НПО «Тайфун» Росгидромета. Панченко С.В. – зав. лаб.; Ведерникова М.В. – научн. сотр., к.т.н. ИБРАЭ РАН.

*Контакты: 249038, Калужская обл., Обнинск, ул. Победы, 4. Тел.: (484) 397-16-89; e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

площадки, в котором важное место занимает определение параметров конечного состояния территории. При этом в соответствии с международными основными нормами безопасности [1, 2], наряду с защитой нынешних и будущих поколений человека от радиационных рисков, при использовании атомной энергии необходимо подтверждать защиту окружающей среды от воздействия радиоактивного загрязнения. В настоящее время в России отсутствуют критерии допустимого радиационного воздействия на человека, а также производные радиоэкологические нормативы остаточного содержания радионуклидов в объектах окружающей среды, позволяющие считать загрязнённую территорию реабилитированной в зависимости от целей её дальнейшего использования [2, 3].

Предметом настоящей работы является разработка количественных операционных критериев реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий размещения ОИАЭ, обеспечивающих радиационную безопасность человека и окружающей среды.

Материалы и методы

В качестве практических критериев обеспечения радиационно-экологической безопасности при реабилитации загрязнённой радионуклидами территории целесообразно использовать контрольные уровни (КУ) содержания радионуклидов в почве (операционный критерий), которые могут быть непосредственно сопоставлены с данными прямых измерений параметров радиоактивного загрязнения.

Оценка контрольных уровней содержания радионуклидов в почве по радиационно-гигиеническому критерию

Расчёт КУ для i -го радионуклида, присутствующего в почве загрязнённой радионуклидами территории ОИАЭ, проводился по формуле [3, 4]:

$$КУ_i = КЗ_i \cdot C_{s,i},$$

где $КУ_i$ – контрольные уровни плотности загрязнения грунта i -м радионуклидом, Бк/м²; $C_{s,i}$ – плотность загрязнения грунта i -м радионуклидом, Бк/м²; $КЗ_i$ – коэффициент запаса для i -го радионуклида, определяемый по формуле:

$$КЗ_i = \frac{ПД}{ЕД_i},$$

где $ПД$ – предел дозы допустимого облучения для человека; $ЕД_i$ – доза облучения человека от i -го радионуклида.

Согласно рекомендациям МАГАТЭ [1, 5], референтным пограничным уровнем радиологической опасности для принятия решения о необходимости реабилитации территории является дозовая нагрузка на человека 20 мЗв/год. Это значение дозовой нагрузки принято в качестве $ПД$.

При расчёте КУ по радиационно-гигиеническому критерию учитывались такие пути облучения человека как внешняя доза и ингаляция атмосферного воздуха, т.е. предполагалось чисто индустриальное использование загрязнённой территории ОИАЭ: без выращивания и потребления местных сельскохозяйственных продуктов и воды.

Внутренняя доза облучения при вдыхании радионуклидов $H_{inh,i}$ определялась из соотношения:

$$H_{inh,i} = \varepsilon_{inh,i} \cdot U_{inh} \cdot C_{air,s,i} \cdot C_{work},$$

где $\varepsilon_{inh,i}$ – фактор дозовой конверсии при ингаляции i -го радионуклида, Зв/Бк; U_{inh} – интенсивность дыхания человека, м³/год; $C_{air,s,i}$ – концентрация радионуклида в воздухе с учётом ресуспензии, Бк/м³; C_{work} – часть времени, проводимая на промплощадке (консервативно принимается $C_{work}=0,3$).

Концентрация радионуклида в воздухе с учётом ресуспензии рассчитывалась следующим образом:

$$C_{air,s,i} = C_{s,i} \cdot K_{в.п\infty},$$

где $C_{s,i}$ – плотность загрязнения грунта i -м радионуклидом, Бк/м²; $K_{в.п}$ – фактор ресуспензии, определяемый как отношение результирующей в данной точке концентрации радиоактивного вещества в приземном слое воздуха (Бк/м³) к плотности радиоактивного загрязнения в этой точке (Бк/м²), м⁻¹, $K_{в.п\infty}$ – равновесный фактор ресуспензии, м⁻¹. Значение $K_{в.п\infty}$ находится в пределах $10^{-8} - 10^{-10}$ м⁻¹, рекомендованное его среднее значение 10^{-9} м⁻¹ [6, 7].

Внешняя доза облучения от загрязнённой радионуклидом поверхности земли H_{si} рассчитывалась по формуле:

$$H_{si} = C_{s,i} \cdot R_s^i \cdot k_s^i \cdot C_{work},$$

где $C_{s,i}$ – плотность загрязнения грунта i -м радионуклидом, Бк/м²; R_s^i – дозовый фактор конверсии при облучении от поверхности грунта для i -го радионуклида, (Зв·м²/Бк·год), k_s^i – коэффициент экранирования облучения от грунта; C_{work} – часть времени, проводимая на промплощадке ($C_{work}=0,3$).

Выбор параметров для расчётов базировался на рекомендациях [8, 9]. Значения дозовых коэффициентов внутреннего облучения от ингаляции были взяты в соответствии с [1, 10].

Оценка контрольных уровней содержания радионуклидов в почве по экологическому критерию

В соответствии с [11-12] расчёты КУ по экологическому критерию проводились при условии предельно допустимого радиационно-экологического воздействия на объекты биоты: для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*, равного 1,0 мГр в сутки; для растений (кроме сосны обыкновенной) и беспозвоночных животных, равного 10 мГр в сутки.

В качестве представительных объектов наземной биоты для оценки радиационно-экологического воздействия на загрязнённой территории промплощадки ОИАЭ были выбраны следующие группы организмов наземной биоты: деревья (сосна), наземные млекопитающие (мышевидные грызуны), дождевые черви. В соответствии с [11] выбор этих объектов в качестве представительных обусловлен следующим. Мышевидные грызуны и дождевые черви являются экологически значимыми объектами фауны, доступными для радиоэкологического мониторинга, способными к самовосстановлению. Мышевидные грызуны характеризуются относительно высокой радиочувствительностью, а дождевые черви могут подвергаться более высоким дозовым нагрузкам на промплощадке по сравнению с другими организмами вследствие постоянного пребывания в загрязнённом грунте. Из представителей флоры сосна является наиболее радиочувствительным видом, что имеет важное значение для консервативной оценки КУ. Отметим, что при рассмотрении конкретной площадки ОИАЭ расчёт КУ следует производить с учётом региональной специфики видового состава биоты, реально обитающей в районе расположения рассматриваемого ОИАЭ.

При оценке величины радиационно-экологического воздействия учитывались следующие пути облучения: внутреннее – от радионуклидов, накопленных организмами биоты; внешнее – от почвы.

КУ удельной активности i -го радионуклида в почве для n -го представительного объекта наземной биоты $A_{m,i,n,эк}$, Бк/кг, рассчитывался по формуле [13]:

$$A_{m,i,n,эк} = \frac{P_{max,n}}{(DCF_{i,n,1} \cdot CF_{i,n,4} + DCF_{i,n,4}) \cdot \tau},$$

где $P_{max,n}$ – критерий предельно допустимого радиационно-экологического воздействия на n -й представительный объект наземной биоты, мГр/сут; $DCF_{i,n,1}$ – фактор дозовой конверсии для внутреннего облучения n -го представительного объекта наземной биоты от i -го радионуклида, (мГр/ч)/(Бк/кг сырого веса); $CF_{i,n,4}$ – коэффициент накопления i -го радионуклида в n -м представительном объекте наземной биоты, (Бк/кг сырой массы)/(Бк/кг почвы); $DCF_{i,n,4}$ – фактор дозовой конверсии для внешнего облучения n -го представительного объекта наземной биоты от i -го радионуклида, (мГр/ч)/(Бк/кг сырого веса); τ – переводной коэффициент, равный $2,4 \cdot 10^{-2}$ (мГр/сут)/(мГр/ч).

КУ удельной активности i -го радионуклида рассчитывался для верхнего 10-сантиметрового слоя почвы для объектов биоты, обитающих на поверхности, либо верхнего 50-сантиметрового слоя почвы для объектов биоты, обитающих внутри почвы.

Значение $CF_{i,n,4}$ рекомендуется определять на основе данных наблюдений для исследуемой территории. В случае отсутствия таких данных следует использовать значения, представленные в Р 52.18.820 [11]. Там же приведены значения параметров $DCF_{i,n,1}$, $DCF_{i,n,4}$.

Результаты и обсуждение

Контрольные уровни по радиационно-гигиеническому критерию

Контрольные уровни содержания радионуклидов в почве при пределе дозы для человека 20 мЗв/год, рекомендуемом МАГАТЭ [5] для принятия решения о необходимости реабилитации территории, приведены в табл. 1. Из рассмотренных радионуклидов наименьшие значения КУ характерны для γ -излучающих радионуклидов (в Бк/кг): ^{60}Co , $6,4 \cdot 10^3$; ^{154}Eu , $1,3 \cdot 10^4$; ^{137}Cs , $2,6 \cdot 10^4$; а также с учётом внешнего облучения от дочерних радионуклидов для ^{226}Ra , $9,3 \cdot 10^3$; ^{232}Th , $6,4 \cdot 10^3$.

Таблица 1

Значения КУ содержания радионуклидов в почве для человека

Радионуклид	Период полураспада, лет	КУ, Бк/м ²	КУ, Бк/кг	ПЗУА [14], Бк/кг
^{60}Co	5,27	$9,0 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^3$	10^4
^{90}Sr	29,1	$4,2 \cdot 10^8$	$3,0 \cdot 10^6$	10^5
^{99}Tc	$2,13 \cdot 10^5$	$2,6 \cdot 10^{10}$	$1,9 \cdot 10^8$	10^6
^{137}Cs	30	$3,6 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^4$	10^4
^{154}Eu	8,8	$1,8 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^4$	10^4
^{226}Ra	$1,6 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^6$	$9,3 \cdot 10^3$	10^4
^{232}Th	$1,40 \cdot 10^{10}$	$9,0 \cdot 10^5$	$6,4 \cdot 10^3$	10^3
^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$	$1,3 \cdot 10^7$	$9,3 \cdot 10^4$	10^4
^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$	$8,4 \cdot 10^7$	$6,0 \cdot 10^5$	10^4

Примечание: в условиях равновесия с дочерними радионуклидами: $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$, $^{137}\text{Cs} - ^{137\text{m}}\text{Ba}$, $^{226}\text{Ra} - ^{222}\text{Rn}$, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po ; $^{232}\text{Th} - ^{228}\text{Ra}$, ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl (0,36), ^{212}Po (0,64); $^{235}\text{U} - ^{231}\text{Th}$; $^{238}\text{U} - ^{234}\text{Th}$, $^{234\text{m}}\text{Pa}$.

Основной вклад в дозу облучения человека для γ -излучающих радионуклидов даёт внешнее облучение от грунта. Для радионуклидов, не являющихся источником внешнего облучения, КУ на порядок и более выше по сравнению с γ -излучателями. Для ^{60}Co рассчитанные значения КУ ниже по сравнению с ПЗУА [14], для ^{154}Eu , ^{226}Ra – близки величине ПЗУА, для остальных рассмотренных радионуклидов более жёсткими являются величины ПЗУА.

Контрольные уровни по экологическому критерию

Значения КУ $A_{m,i,n,эк}$ для представительных объектов наземной биоты на загрязнённой радионуклидами территории ОИАЭ приведены в табл. 2, значения КУ для критической группы наземной биоты – в табл. 3.

Таблица 2

Значения КУ удельной активности радионуклидов в почве для представительных объектов наземной биоты

Радионуклид	КУ, Бк/кг		
	Деревья	Млекопитающие	Дождевые черви
^{60}Co	$1,0 \cdot 10^5$	$8,1 \cdot 10^4$	$3,2 \cdot 10^4$
^{90}Sr	$1,3 \cdot 10^5$	$3,8 \cdot 10^4$	$8,9 \cdot 10^6$
^{99}Tc	$2,7 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^6$	$1,9 \cdot 10^6$
^{137}Cs	$2,9 \cdot 10^5$	$4,0 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^5$
^{154}Eu	$1,3 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^5$	$6,6 \cdot 10^4$
^{226}Ra	$1,5 \cdot 10^5$	$7,1 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^4$
^{232}Th	$1,6 \cdot 10^7$	$1,4 \cdot 10^8$	$2,0 \cdot 10^6$
^{235}U	$9,8 \cdot 10^5$	$3,1 \cdot 10^6$	$4,6 \cdot 10^5$
^{238}U	$2,5 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^8$	$1,9 \cdot 10^6$

Таблица 3

Значения КУ удельной активности радионуклидов в почве для критической группы наземной биоты

Радионуклид	Значение КУ $A_{m,i,n,эк}$, Бк/кг	Критическая группа наземной биоты
^{60}Co	$3,2 \cdot 10^4$	Дождевой червь
^{90}Sr	$3,8 \cdot 10^4$	Млекопитающие
^{99}Tc	$2,7 \cdot 10^4$	Дерево
^{137}Cs	$4,0 \cdot 10^4$	Млекопитающие
^{154}Eu	$6,6 \cdot 10^4$	Млекопитающие
^{226}Ra	$1,9 \cdot 10^4$	Дождевой червь
^{232}Th	$2,0 \cdot 10^6$	Дождевой червь
^{235}U	$4,6 \cdot 10^5$	Дождевой червь
^{238}U	$1,9 \cdot 10^6$	Дождевой червь

При наличии в почве смеси радионуклидов должно выполняться соотношение:

$$\sum_i \frac{A_{m,i}}{A_{m,i,n,эк}} \leq 1,$$

где $A_{m,i}$ – удельная активность i -го радионуклида в верхнем 10-сантиметровом слое почвы для объектов биоты, обитающих на поверхности, либо верхнем 50-сантиметровом слое почвы для объектов биоты, обитающих внутри почвы, Бк/кг.

Выполнение этого соотношения обеспечивает отсутствие негативного радиационно-экологического воздействия на объекты наземной биоты загрязнённой территории ОИАЭ. Превышение КУ и нарушение соотношения являются основанием для рассмотрения вопроса о реабилитации загрязнённой радионуклидами территории по экологическому критерию.

Сравнение экологических и радиационно-гигиенических критериев реабилитации загрязнённой территории

В целях выбора единого критерия реабилитации загрязнённой радионуклидами территории, обеспечивающего безопасность человека и биоты, необходимо произвести сопоставление рассчитанных значений контрольных уровней по экологическому и радиационно-гигиеническому принципам (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение КУ содержания радионуклидов в почве по экологическому и радиационно-гигиеническому критериям

Радионуклид	КУ (экологический критерий), Бк/кг	КУ (радиационно-гигиенический критерий), Бк/кг	ПЗУА [14], Бк/кг
⁶⁰ Co	$3,2 \cdot 10^4$	$6,4 \cdot 10^3$	10^4
⁹⁰ Sr	$3,8 \cdot 10^4$	$3,0 \cdot 10^6$	10^5
⁹⁹ Tc	$2,7 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^8$	10^7
¹³⁷ Cs	$4,0 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^4$	10^4
¹⁵⁴ Eu	$6,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	10^4
²²⁶ Ra	$1,9 \cdot 10^4$	$9,3 \cdot 10^3$	10^4
²³² Th	$2,0 \cdot 10^6$	$6,4 \cdot 10^3$	10^3
²³⁵ U	$4,6 \cdot 10^5$	$9,3 \cdot 10^4$	10^4
²³⁸ U	$1,9 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^5$	10^4

Выбор в качестве единого норматива контрольных уровней содержания радионуклидов в почве наиболее консервативного критерия, удовлетворяющего как радиационно-гигиеническим, так и экологическим требованиям, обеспечивает радиационную безопасность как человека, так и окружающей среды [15, 16].

Сравнение контрольных уровней содержания радионуклидов в почве (табл. 4) показывает, что для ⁹⁰Sr, ⁹⁹Tc экологический критерий жёстче санитарно-гигиенического и становится лимитирующим фактором при решении вопросов о необходимости реабилитации территории. В ряде случаев (для изотопов естественного происхождения: ²³²Th, ²³⁸U и большинства трансуранных элементов) в качестве лимитирующего фактора может быть рассмотрено значение ПЗУА, которое оказывается жёстче двух других критериев. В связи с этим возникает вопрос: насколько корректно были в своё время оценены значения ПЗУА для отдельных радионуклидов? Возможно, правомочно при подготовке следующей редакции нормативных документов по отнесению отходов к радиоактивным отходам скорректировать значения ПЗУА для ряда радионуклидов, расширив число рассматриваемых ситуаций облучения человека и биоты.

Следует также добавить, что пограничный уровень радиологической опасности для принятия решения о необходимости реабилитации территории в виде дозовой нагрузки не имеет в настоящее время в отечественной практике чёткой регламентации. Следовательно, использование значения дозовой нагрузки на репрезентативного индивидуума – 20 мЗв/год – является лишь иллюстративным примером предложенного методического подхода для получения операционных критериев реабилитации радиоактивно загрязнённых промышленных площадок ОИАЭ.

Заключение

Выбор критериев реабилитации радиационно загрязнённой территории размещения ОИАЭ не всегда может быть осуществлён только по радиационно-гигиеническому принципу. Значимость экологического критерия реабилитации обусловлена тем фактом, что, несмотря на более высокие уровни экологически безопасного облучения для объектов живой природы по сравнению с человеком, объекты биоты подвергаются радиационному воздействию практически по всем возможным путям и, соответственно, получают более высокие дозовые нагрузки.

Человек, в отличие от биоты, не связан с загрязнённой территорией пищевыми цепочками. Единственными путями облучения от γ -излучающих радионуклидов для него являются внешнее облучение от земной поверхности и вдыхание воздуха, а для β - и α -излучающих радионуклидов – только ингаляция. Таким образом, при разработке критериев реабилитации загрязнённых радионуклидами территорий промплощадок ОИАЭ необходимо использовать как радиационно-гигиенические, так и экологические требования. Проблемным вопросом при выборе критериев реабилитации остаётся использование в ряде случаев значений ПЗУА. Также правомочной остаётся задача корректировки самих этих значений за счёт как расширения рассматриваемых сценариев облучения, так и использования более реалистичных моделей оценки радиационного воздействия на человека и биоту.

Литература

1. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
2. **Панов А.В., Санжарова Н.И., Гераськин С.А., Переволоцкая Т.В., Гордиенко Е.В., Михайлова Р.А.** Анализ международных подходов к обеспечению радиационной безопасности населения и окружающей среды при реабилитации объектов и территорий, загрязнённых в результате прошлой деятельности предприятий ядерного топливного цикла //Радиация и риск. 2016. Т. 25, № 3. С. 86-103.
3. **Крышев А.И., Бадалян К.Д., Сазыкина Т.Г., Крышев И.И.** Оценка допустимого содержания радионуклидов в почве по уровням радиационного риска для населения с учётом целей землепользования //Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. Выпуск 8. Екатеринбург, 2006. С. 174-195.
4. **Kryshev A.I., Kryshev I.I., Badalian K.D., Sazykina T.G.** Assessment of permissible levels of radionuclides in soil for different types of land-use //Appl. Radiat. Isot. 2008. V. 66, N 11. P. 1572-1574.
5. IAEA. Remediation Process for Areas Affected Contaminated by Past Activities and Accidents. Revision of Safety Guide WS-G-3.1. Draft Safety Guide DS468. IAEA Safety Standards for protection people and the environment. Vienna: IAEA, 2016. 98 p.
6. **Махонько К.П.** Ветровой подъём радиоактивной пыли с земли. Обнинск: ГУ НПО «Тайфун», 2008. 427 с.
7. **Романов Г.Н.** Ликвидация последствий радиационных аварий. Справочное руководство. М.: ИздАТ, 1993. 334 с.
8. Методические рекомендации по расчёту нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ из организованных источников в атмосферный воздух применительно для организаций Госкорпорации «Росатом». Утв. распоряжением ГК «Росатом» от 15.07.2014 г. № 1-1/310-Р. 85 с.
9. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Утв. приказом Ростехнадзора от 7 ноября 2012 г. № 639.
10. НРБ-99/2009. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
11. Рекомендации Р 52.18.820-2015. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет /Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И., Лунева К.В., Скакунова М.А., Санина К.Д. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2015. 50 с.
12. ICRP Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants //Ann. ICRP. 2009. 251 p.
13. Рекомендации Р 52.18.853-2016. Министерство природных ресурсов и экологии РФ, Росгидромет /Крышев А.И., Сазыкина Т.Г., Крышев И.И., Лунева К.В., Санина К.Д., Косых И.В., Скакунова М.А., Дайнеко Е.И. Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в пресной воде и почве //Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды: сб. рекомендаций. Обнинск, 2016. С. 29-55.
14. Санитарные правила и нормативы СП 2.6.1.2612-10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010). Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 26 апреля 2010 г. № 40 (с учётом постановления Главного государственного санитарного врача РФ от 16 сентября 2013 г. № 43 «О внесении изменений в отдельные санитарные правила, устанавливающие требования в области радиационной безопасности»).
15. **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.

16. Панченко С.В., Линге И.И., Воробьёва Л.М., Капырин И.В., Савкин М.Н., Уткин С.С., Аракелян А.А., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., Иванов В.К., Горский А.И., Гераськин С.А., Удалова А.А., Новиков С.М., Унгарян Т.Н., Курындин А.В., Строганов А.А. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту /Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М.: «САМ полиграфист», 2015. 265 с.

Remediation criteria for radioactively contaminated nuclear sites

Kryshev I.I., Kryshev A.I., Panchenko S.V.¹, Vedernikova M.V.¹

Federal State Budgetary Institution "Research and Production Association "Typhoon", Obninsk;

¹ Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Moscow

The paper presents new methods for estimating operational criteria for remediation of radioactively contaminated nuclear sites in compliance with current environmental and radiation-hygiene requirements. Reference levels of radionuclide content in soils were calculated using numerical modeling based on exposure limits set for humans and non-human biota species. Operational levels of a variety of radionuclides content in soil calculated with respect to environmental and radiation-hygiene criteria for remediation of specific areas within contaminated sites were compared with specific activity limits (SCL) set for solid radioactive waste categorization. The findings suggest that each of these three criteria can be considered as a limiting factor. More strict values of reference levels estimated with regard to ecological criterion were set for ⁹⁰Sr and ⁹⁹Tc. The results indicate that SCL can be considered as the prime criterion if contaminants are natural isotopes ²³²Th and ²³⁸U, as well as the majority of transuranium elements. Radiation-hygiene criteria play a key role for the majority of γ -emitting isotopes (⁶⁰Co, ¹³⁷Cs and etc.). Relatively high impact of the environmental factors in remediation of contaminated nuclear sites is attributable to the fact that radiation exposure pathways to biota differ from those to a man, non-human biota species are continuously exposed to radiation and receive higher doses. People being at a nuclear site are not involved in its intrinsic food chains. Thus, for γ -emitting isotopes human exposure pathways are reduced to external exposure coming from contaminated ground surface and inhalation, as for α - and β -emitting radionuclides, inhalation is the only possible pathway. The findings suggest that all three criteria shall be considered in the development of remediation criteria for radioactively contaminated nuclear sites. The remaining issue requiring regulatory clarification is the potential application of SCL levels in the decision making process when it comes to demonstrating that remedial efforts are required at specific industrial sites.

Key words: remediation, environmental criterion, radiation and hygienic criteria, nuclear site, dose, radionuclides, environment, soil, reference level, biota.

References

1. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. Vienna, IAEA, 2014. 436 p.
2. Panov A.V., Sanzharova N.I., Geraskin S.A., Perevolotskaya T.V., Gordienko E.V., Mikailova R.A. Survey of international approaches to ensuring radiation safety of the public and environment during remediation of radioactively contaminated sites of former nuclear fuel cycle facilities. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2016, vol. 25, no. 3, pp. 86-103. (In Russian).
3. Kryshev A.I., Kryshev I.I., Badalian K.D., Sazykina T.G. Evaluation of permissible radionuclide content in soils considering population radiation risk levels and future land uses. *Problemy radioekologii i pograniichnykh distsiplin – Challenges in Radioecology and Allied Disciplines*. Issue 8. Ekaterinburg, 2006, pp.174-195. (In Russian).

Kryshev I.I.* – Main Researcher, D. Sc., Phys.-Math., Prof.; Kryshev A.I. – Head of Lab., D. Sc., Biol. RPA "Typhoon". Panchenko S.V. – Head of Lab.; Vedernikova M.V. – Researcher, C. Sc., Tech. IBRAE RAS.

*Contacts: 4 Pobedy str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249038. Tel.: (484) 397-16-89; e-mail: kryshev@rpatyphoon.ru.

4. **Kryshev A.I., Kryshev I.I., Badalian K.D., Sazykina T.G.** Assessment of permissible levels of radionuclides in soil for different types of land-use. *Appl. Radiat. Isot.*, 2008, vol. 66, no. 11, pp. 1572-1574.
5. IAEA. Remediation Process for Areas Affected Contaminated by Past Activities and Accidents. Revision of Safety Guide WS-G-3.1. Draft Safety Guide DS468. IAEA Safety Standards for protection people and the environment. Vienna, IAEA, 2016. 98 p.
6. **Mahonko K.P.** Windblown entrainment of radioactive dust from earth surface. Obninsk, RPA «Typhoon», 2008. 427 p. (In Russian).
7. **Romanov G.N.** Elimination of the consequences of radiation accidents. Reference Guide. Moscow, IzdAT, 1993. 334 p. (In Russian).
8. Guidelines on the assessment maximum permissible air emissions of radioactive substances from stationary sources owned by the State Corporation «Rosatom» entities, approved by the Order of SC «Rosatom» on July 15, 2014, N 1-1/310-P. 85 p. (In Russian).
9. Guiding principles on the development and establishment of standards for maximum permissible air emissions of radioactive substances, approved by Rostekhnadzor order of November 7, 2012, N 639. (In Russian).
10. Radiation Safety Standards (NRB-99/2009). Sanitary rules and regulations, SanPiN 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal Center of Hygiene and Epidemiology, 2009. 100 p. (In Russian).
11. Recommendations R 52.18.820-2015. Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Roshydromet. Authors: Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kryshev I.I. Luneva K.V., Sanina K.D. Assessment of radiation and environmental impacts on natural environment based on radiation monitoring data. Obninsk, 2015. 50 p. (In Russian).
12. ICRP Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. *Ann. ICRP*, 2009. 251 p.
13. Recommendations R 52.18.853-2016. Russian Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Roshydromet. Authors: Kryshev A.I., Sazykina T.G., Kryshev I.I. Luneva K.V., Sanina K.D., Kosih I.V., Skakuniva M.A., Daineko E.I. Guidelines for calculating reference levels of radionuclide content in fresh water and soil. Collected volume: operating procedure for calculating reference levels of radionuclides in natural environment. Obninsk, 2016, pp. 29-55. (In Russian).
14. SP 2.6.1.2612-10. Basic sanitary rules for ensuring radiation safety (OSPORB-99/2010). (In Russian).
15. **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).
16. **Panchenko S.V., Linge I.I., Vorobieva L.M., Kapyrin I.V., Savkin M.N., Utkin S.S., Arakelyan A.A., Kryshev I.I., Sazykina T.G., Ivanov V.K., Gorskiy A.M., Geraskin S.A., Udalova A.A., Novikov S.M., Ungaryn T.N., Kuryndin A.V., Striganov A.A.** Practical guidelines concerning the assessment of radiation impacts on human and biota species. Eds.: I.I. Linge and I.I. Kryshev. Moscow, «SAM Poligrafist», 2015. 265 p. (In Russian).