

Оценка радиозоологической значимости радионуклидов в составе выбросов Казахстанской АЭС

Майра Мукушева^{1*}, Сергей Спиридонов², Рена Микаилова², Анна Топорова¹

¹РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан; mukusheva@nnc.kz, toporova@nnc.kz

²НИЦ «Курчатовский институт» – ВНИИРАЭ, Обнинск, Россия; spiridonov.si@gmail.com, renchik_vhi@mail.ru

*Корреспонденция: mukusheva@nnc.kz

Аннотация. Выполнены расчеты дозовых нагрузок на население от выбросов и сбросов планируемой Казахстанской АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200. Расчеты показали, что дозовые нагрузки на население в течение всего периода эксплуатации АЭС значительно ниже установленного дозового предела и минимальной дозовой квоты. Выполнены расчетные оценки, представляющие интерес при разработке регламента радиозоологического мониторинга (РЭМ) территории, прилегающей к планируемой АЭС. Установлено, что основными дозообразующими стационарными радионуклидами являются ^{14}C и инертные радиоактивные газы (ИРГ), в меньшей степени – ^3H . Рассчитаны парциальные дозовые нагрузки на население от радионуклидов, содержащихся в компонентах окружающей среды и агропродукции. Наиболее значимым вкладчиком в дозовую нагрузку на население является ^{14}C в составе растительной продукции, в меньшей степени – в мясе и молоке. Важным результатом данных расчетов является подтверждение ведущей роли агросферы в формировании дозовой нагрузки на население при функционировании АЭС. С целью оценки возможностей РЭМ прилегающей территории рассчитано содержание стационарных радионуклидов в почве и агропродукции. Установлено, что удельные активности ряда стационарных радионуклидов существенно ниже порога обнаружения. Для реактора ВВЭР-1200 радионуклидом с максимальным содержанием в агропродукции будет ^3H . Это обстоятельство может быть учтено при разработке регламента РЭМ агроэкосистем в зоне влияния планируемой Казахстанской АЭС.

Цитирование: Мукушева, М., Спиридонов, С., Микаилова, Р., Топорова, А. (2026). Оценка радиозоологической значимости радионуклидов в составе выбросов Казахстанской АЭС. *Journal of Ecology and Sustainability*, 156(3), 139-152. <https://doi.org/10.32523/9ay4dx94>

Академический редактор:
А. Зандыбай

Поступила: 03.04.2026
Исправлена: 14.09.2026
Принята: 22.09.2026
Опубликована: 30.09.2026



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Ключевые слова: АЭС; реактор ВВЭР-1200; дозы облучения населения; дозовые критерии; индексы радиационного воздействия; дозообразующие радионуклиды; эффективная доза.

1. Введение

Необходимыми условиями эксплуатации ядерно-энергетических объектов являются обеспечение возможности оперативного прогнозирования последствий аварийных ситуаций и проведение радиозоологического мониторинга. В этой связи важной

задачей является разработка программ РЭМ для территорий, прилегающих к функционирующим АЭС (Mukusheva et al., 2025).

Данные, полученные в ходе РЭМ, являются основой для оценки дозовых нагрузок на население, проживающее на этих территориях. В качестве дополнительной информации могут использоваться результаты радиационного контроля на самом объекте и в пределах его санитарно-защитной зоны.

Ключевой проблемой при выявлении радиоактивного загрязнения в условиях штатной работы радиационных объектов является фоновое присутствие радионуклидов естественного происхождения, глобальных выпадений. Это существенно затрудняет достоверную идентификацию новых загрязнений. Для минимизации неопределенностей на территориях с действующими объектами, а также на этапе подготовки к вводу новых объектов в эксплуатацию, необходимо проведение предварительного радиационно-экологического мониторинга. Его цель – формирование референтной базы данных по фоновым параметрам радиационной обстановки, что позволит в дальнейшем объективно оценивать изменения.

При разработке оптимальных регламентов РЭМ необходимо учитывать характеристики техногенных радионуклидов, поступающих в окружающую среду (ОС) при работе АЭС, и региональные особенности месторасположения станции. Важный этап разработки таких регламентов – расчет дозовых нагрузок на население от выбросов и сбросов АЭС с выделением наиболее радиологически значимых радионуклидов (Spiridonov et al., 2019; Kryshev et al., 2020). Кроме того, сопоставление концентраций станционных радионуклидов в компонентах ОС и агропродукции с пределами обнаружения позволит оценить возможности РЭМ в отношении радиоэкологического контроля АЭС (Panov et al., 2019; Kuznetsov et al., 2020).

В рамках развития ядерной энергетики в Республике Казахстан принято решение о строительстве АЭС, согласно предложению корпорации «Росатом» Российской Федерации, с реактором ВВЭР-1200 поколения 3+. На этапе планирования и строительства необходимо выполнить работы, связанные как с формированием референтной базы данных по фоновым параметрам радиационной обстановки в районе расположения будущей АЭС, так и с оценкой радиоэкологической значимости станционных радионуклидов для разработки регламента РЭМ (Bréchignac et al., 2016).

Цель исследований, результаты которых приведены в настоящей публикации, – выделение основных дозообразующих радионуклидов в составе выбросов планируемой Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200 и прогнозирование их содержания в компонентах окружающей среды и агропродукции.

Научная новизна данного исследования, в отличие от ранее опубликованных прогнозных работ авторов (Mukusheva et al., 2024; 2025), заключается в проведении комплексной парциальной оценки дозообразующих путей с наложением результатов математического моделирования на реальные аналитические пределы обнаружения современных радиометрических систем. Впервые для специфических условий площадки размещения Казахстанской АЭС в пос. Улькен доказано, что штатный мониторинг стандартного перечня гамма-излучающих нуклидов в почве (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co и др.) методами прямой спектрометрии будет неэффективен из-за падения расчетных концентраций на несколько порядка ниже порогов чувствительности серийных приборов. На основе этого научно обоснована необходимость переориентации национального регламента РЭМ агро сферы региона на приоритетный контроль биогенных радионуклидов ^{14}C и ^3H .

2. Материалы и методы

Модельный аппарат, применяемый для оценки доз внешнего и внутреннего облучения населения, формируется в соответствии с количеством путей радиационного воздействия. При этом рассматриваются различные возрастные группы населения – взрослое население старше 17 лет, дети младшего возраста (1-2 года) и дети других возрастных групп.

Процесс облучения разделяется на типичные ситуации, для каждой из которых используется соответствующая модель внутреннего или внешнего облучения. Каждая из моделей включает свой дозовый коэффициент, связывающий концентрацию радионуклидов в объектах окружающей среды с характеристикой облучения человека – эффективной дозой. Дополнительными данными для расчета ингаляционного поступления радионуклидов в организм человека являются среднегодовой объем вдыхаемого воздуха, а для расчета поступления радионуклидов в организм человека с продуктами питания и водой – их годовое потребление. Годовое потребление продуктов питания должно быть оценено на основании региональных данных.

Для математического моделирования переноса радионуклидов в атмосфере и их последующего накопления в компонентах агроэкосистем в программном комплексе CROM (версия 8.2.5) используется система уравнений баланса массы в установившемся (равновесном) состоянии согласно методологии МАГАТЭ (IAEA, 2001). Расчет концентрации радионуклидов в почве C_{soil} (Бк/кг) при непрерывном многолетнем загрязнении проводится по формуле:

$$C_{soil} = \frac{R \times (1 - e^{-\lambda_{eff} \times t})}{\rho \times \lambda_{eff}}, \quad (1)$$

где R – скорость суммарного (сухого и влажного) осаждения радионуклида из атмосферы на подстилающую поверхность (Бк/(м²год)); λ_{eff} – эффективная постоянная удаления радионуклида из корнеобитаемого слоя почвы (год⁻¹), учитывающая радиоактивный распад и процессы фиксации/выщелачивания; ρ – поверхностная плотность сухой почвы (кг/м²); t – период эксплуатации АЭС (год).

Переход радионуклидов в растительную агропродукцию (C_{veg} , Бк/кг) из почвенного депо и атмосферного воздуха описывается уравнением:

$$C_{veg} = \left[\frac{R \times (1 - e^{-\lambda_e \times t_v})}{Y \times \lambda_e} \right] + C_{soil} \times F_v, \quad (2)$$

где λ_e – эффективная постоянная очищения поверхности растений от аэрозольных выпадений (год⁻¹); t_v – период вегетации культур (год); Y – урожайность сельскохозяйственной культуры (кг/м²); F_v – коэффициент почвенно-растительного перехода (накопления) радионуклида (б/р).

Для биогенных радионуклидов ³H и ¹⁴C вместо стандартных равновесных коэффициентов накопления применялся специализированный подход (Kryshev et al., 2020; Ekidin et al., 2016), связывающий концентрацию изотопов в тканях растений и животных непосредственно с содержанием водорода и углерода в компонентах рационов питания и влаге приземного слоя воздуха.

По результатам анализа сведений об источниках выброса устанавливают перечень радионуклидов, выбрасываемых в атмосферный воздух, химическую форму веществ, в виде которых эти радионуклиды поступают в окружающую среду, и дисперсный состав выбрасываемых аэрозолей (Spiridonov et al., 2023; Lipták et al., 2019).

Среди рассматриваемых групп населения выбирается группа с наибольшим значением дозовой нагрузки, которая и будет критической группой по отношению к облучению от радиационного объекта. Суммарная дозовая нагрузка на критическую группу сравнивается с квотой или дозовым пределом дополнительного (по отношению к радиационному фону) облучения.

Для прогнозирования дозовых нагрузок на население на территории, прилегающей к Казахстанской АЭС, использовали программный пакет CROM (версия 8.2.5) (Robles et al., 2007; Mukusheva et al., 2024), разработанный на основе моделей, представленных в документе МАГАТЭ (IAEA, 2001). Этот пакет аккумулирует модели, описывающие поведение

радионуклидов в атмосфере и природных средах, а также их накопление в компонентах экосистем и пищевой продукции (Kargenkov et al., 2018). При расчете дозовых нагрузок от радиологически значимых радионуклидов ^3H и ^{14}C использовали подход (Kryshev et al., 2020; Ekinin et al., 2016), позволяющий учесть рационы питания населения, в отличие от общих равновесных моделей, рекомендуемых МАГАТЭ для этих радионуклидов (IAEA, 2001).

В качестве исходных данных рассматривались значения ожидаемых годовых выбросов радиоактивных газов и аэрозолей в атмосферу, а также радионуклидов в водную среду для выбранной для строительства в Казахстане АЭС с реактором ВВЭР-1200 (IAEA, 2017) (Таблица 1).

Таблица 1. Активности радионуклидов, поступающих в окружающую среду при работе энергоблока с реактором ВВЭР-1200, Бк/год

Радионуклид	Выбросы в атмосферу	Сбросы в водную среду
ИРГ	$4,6 \times 10^{13}$	–
^3H	$3,9 \times 10^{12}$	$9,1 \times 10^{12}$
^{14}C	$3,0 \times 10^{11}$	–
^{131}I	$7,3 \times 10^7$	$2,3 \times 10^7$
^{132}I	$9,7 \times 10^7$	$4,3 \times 10^6$
^{133}I	$1,4 \times 10^8$	$1,0 \times 10^5$
^{134}I	$6,6 \times 10^7$	$3,6 \times 10^6$
^{135}I	$1,1 \times 10^8$	$5,5 \times 10^6$
^{51}Cr	$7,9 \times 10^4$	$8,2 \times 10^5$
^{54}Mn	$4,8 \times 10^3$	$6,2 \times 10^5$
^{58}Co	–	$7,1 \times 10^5$
^{60}Co	$3,1 \times 10^4$	$2,5 \times 10^6$
^{89}Sr	$3,4 \times 10^5$	$1,0 \times 10^6$
^{90}Sr	$6,0 \times 10^2$	$3,1 \times 10^3$
^{134}Cs	$2,0 \times 10^7$	$1,1 \times 10^8$
^{137}Cs	$3,0 \times 10^7$	$1,7 \times 10^8$
Сумма	$5,02 \times 10^{13}$	$9,1 \times 10^{12}$

Казахстанскую АЭС планируют построить в поселке Улькен Жамбылского района Алматинской области, расположенном на берегу озера Балхаш. Для параметризации расчетных моделей использованы данные, характеризующие региональные атмосферные условия и интенсивность миграции радионуклидов в экосистемах (Mukusheva et al., 2025). Состав рационов питания различных возрастных групп населения взят из справочника по нормам потребления в Республике Казахстан (Ministry of National Economy of the RK, 2016).

Расчёт выполнен в рамках точечного консервативного подхода CROM. Рецептор задавался на расстоянии 2 км от источника выброса, условно на границе санитарно-защитной зоны, в направлении преимущественного переноса. Для района Улькена использованы преобладающее западное направление ветра, среднегодовая скорость ветра 1,08 м/с и доля времени переноса в сторону рецептора 25 %. Шероховатость поверхности принималась равной 0,2, высота ближайших зданий – 10 м. Параметры выбирались таким образом, чтобы характеризовать условия повышенной концентрации радионуклидов в приземном слое атмосферы; после выпадения миграция радионуклидов рассматривалась в той же расчётной точке. Поэтому полученные значения следует интерпретировать как консервативные прогнозны оценки, а не как прогноз для конкретного населённого пункта.

Параметры агроэкосистем, включая коэффициенты перехода радионуклидов в растительную продукцию, мясо и молоко, коэффициенты задерживания растительностью, а также параметры водных экосистем, задавались по используемой нормативно-справочной базе CROM и источникам, приведённым в исходном отчёте. Для водного пути учитывались распределение радионуклидов между водой и донными отложениями и их биоаккумуляция в водных организмах. Потребление продуктов питания задавалось для возрастных групп 0-1, 1-2, 2-7, 7-12, 12-17 лет и взрослых по нормативам Республики Казахстан; нормативное потребление рыбы для группы 1-2 года составляет 5,7 кг/год, для взрослых – 11,6 кг/год. В рамках консервативной постановки доля загрязнённой продукции в рационе и доля времени пребывания вне помещений принимались равными 1.

Критическая группа определялась не априорно, а по максимальной рассчитанной годовой эффективной дозе среди рассмотренных возрастных групп. Для ВВЭР-1200 максимальные значения получены для детей 1-2 лет: 1,68 мкЗв/год в первый год и 1,73 мкЗв/год к 60-му году эксплуатации; поэтому эта возрастная группа использована далее как критическая. Пространственно критическая группа относится к описанному выше консервативному рецептору на расстоянии 2 км от источника выброса.

Исходные активности выбросов и сбросов, приведённые в таблице 1, использованы как ожидаемые годовые значения для энергоблока ВВЭР-1200 по опубликованному источнику (IAEA, 2017). Поскольку конкретная проектная документация будущей Казахстанской АЭС на момент выполнения исследования не использовалась, эти значения не следует трактовать как утверждённые эксплуатационные характеристики конкретного энергоблока. Консервативность итоговой оценки обеспечивается, прежде всего, постановкой расчётного сценария и выбором параметров рецептора. Количественная вероятностная оценка неопределённости и анализ чувствительности в настоящую работу не входили. Это ограничение следует учитывать при интерпретации абсолютных прогнозных значений на длительном временном горизонте.

В результате расчетов на основе консервативного подхода оценивались максимальные годовые дозовые нагрузки на критическую группу населения, формируемые стационарными радионуклидами.

3. Результаты

Годовые дозовые нагрузки на население от АЭС с реактором ВВЭР-1200 значительно ниже дозового предела (1 мЗв/год) и минимальной дозовой квоты, которая принимается в качестве нижней границы радиационного воздействия АЭС на население (10 мкЗв/год) (Ministry of Health of the RK, 2020). Сравнительная оценка дозовых нагрузок на различные возрастные группы населения показала, что к критической возрастной группе следует отнести детей возрастом 1-2 года (Mukusheva et al., 2025). Различие дозовых нагрузок на эту возрастную группу и взрослое население составляет 18 %.

Обязательным условием нормальной работы АЭС является соблюдение радиологических нормативов и дозовых квот. В то же время необходимость проведения РЭМ на территории, прилегающей к штатно функционирующей АЭС, остается актуальной

(Guidelines 13.5.13-00, 2005; Fesenko et al., 2021). Согласно рекомендациям МАГАТЭ (IAEA, 2005), радиационный контроль сельскохозяйственной продукции местного производства является неотъемлемым условием работы АЭС.

Значимость сельскохозяйственной продукции в формировании дозовой нагрузки на население от радионуклидов, поступающих в окружающую среду, подтверждается на основе оценок, выполненных для Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200. Употребление продуктов питания, содержащих стационарные радионуклиды, обуславливает формирование 70 % суммарной дозовой нагрузки от АЭС на критическую группу населения (Рисунок 1а).

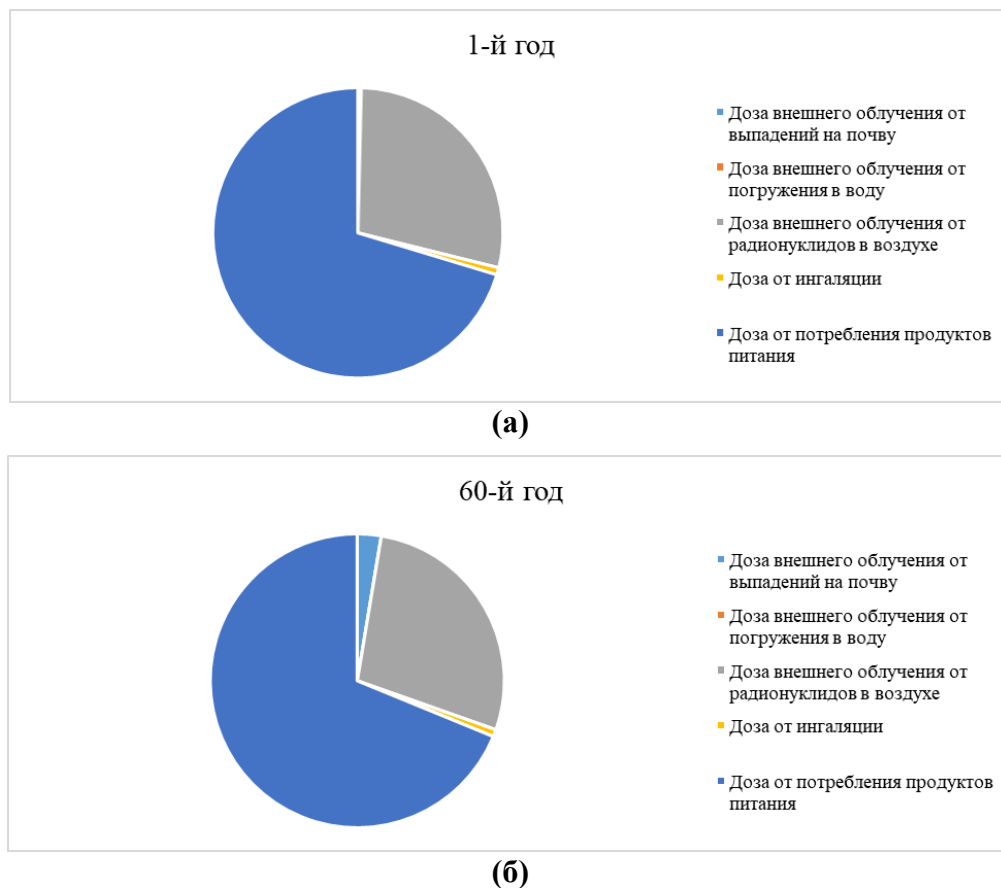


Рисунок 1. Вклады путей облучения критической группы населения от стационарных радионуклидов в 1-й (а) и 60-й (б) годы функционирования Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200

Анализ динамики дозовых нагрузок на критическую группу населения при работе Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200 показал, что вклады различных путей облучения практически не меняются. Можно отметить некоторое увеличение вклада внешнего облучения от радиоактивных выпадений на почву по истечении 60 лет после ввода АЭС в эксплуатацию (Рисунок 1б). Это связано прежде всего с накоплением в почве за время работы станции долгоживущего ^{137}Cs с периодом полураспада 30 лет.

В регламентах РЭМ указываются перечни радионуклидов, определяемых в компонентах ОС и агропродукции с определенной периодичностью. Так, согласно регламенту РЭМ агроэкосистем в зоне воздействия АЭС при штатном режиме эксплуатации (Guidelines 13.5.13-00, 2005), следует отбирать пробы почвы пахотных и кормовых угодий, воды, продукции растениеводства и животноводства, кормов несколько раз в год. Перечни контролируемых радионуклидов включают продукты деления ($^{95}\text{Zr}+^{95}\text{Nb}$, ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I) и продукты активации (^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{59}Fe). Измерять содержание ^3H рекомендуется в воде в период орошения или лова рыбы.

Однако в настоящее время уделяется большое внимание радиологически значимым радионуклидам ^{14}C и ^3H , которые могут вносить определяющий вклад в дозовую нагрузку на население от атмосферных выбросов АЭС (Vasyanovich et al., 2019). В работе (Spiridonov et al., 2025) показано, что содержание в почве измеряемых в ходе РЭМ ^{137}Cs и ^{90}Sr сформировано в результате глобальных и чернобыльских выпадений. Вклад «станционной составляющей» этих радионуклидов не превышает 0,01-0,1 %.

В этой связи при разработке регламента РЭМ зоны влияния Казахстанской АЭС полезно узнать, какие станционные радионуклиды вносят наибольший вклад в дозовую нагрузку. На рисунке 2 представлены вклады отдельных радионуклидов в суммарную дозу облучения критической группы населения в различные годы функционирования Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200.

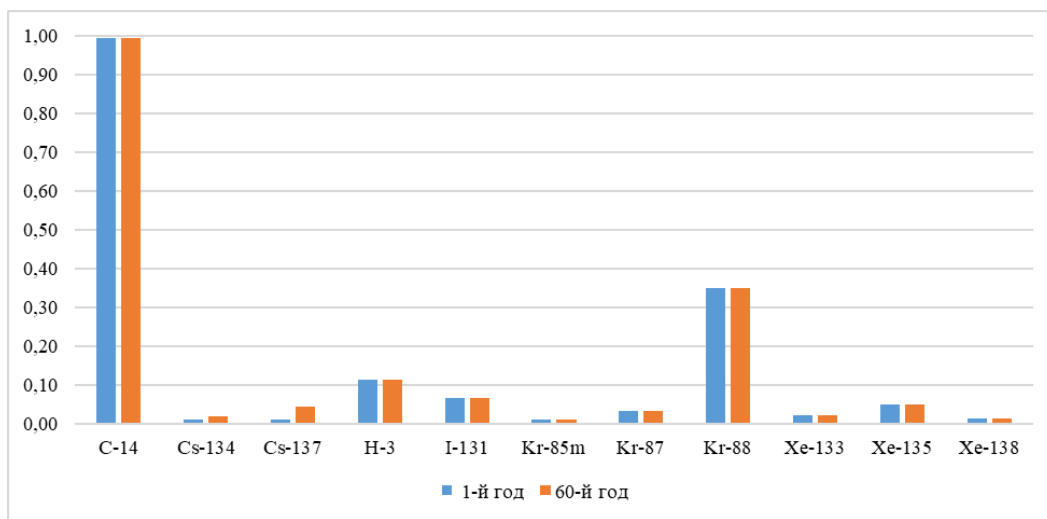


Рисунок 2. Вклады отдельных станционных радионуклидов в суммарную дозу облучения критической группы населения в различные годы функционирования Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200

В рамках более детализированного подхода (Spiridonov et al., 2021) рассчитаны парциальные дозовые нагрузки на население от станционных радионуклидов, содержащихся в компонентах окружающей среды и агропродукции. В таблице 2 представлены вклады станционных радионуклидов, содержащихся в компонентах ОС, в суммарную дозовую нагрузку на население при работе Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200.

Таблица 2. Вклады станционных радионуклидов, содержащихся в компонентах ОС, в суммарную дозовую нагрузку на население при работе Казахстанской АЭС с реактором ВВЭР-1200

Радионуклиды	Время	Компонент ОС (в долях единицы)				
		Воздух	Почва	Молоко	Мясо	Раст. прод.
^{14}C	1-й год	0,0002	0	0,09	0,3	0,64
	60-й год	0,0002		0,09	0,3	0,64
^{134}Cs	1-й год	0,000006	0,004	0,0005	0,0009	0,0056
	60-й год	0,000006	0,012	0,0005	0,001	0,0058

^{137}Cs	1-й год	0,000006	0,002	0,0005	0,001	0,0065
	60-й год	0,000006	0,03	0,001	0,002	0,0081
^3H	1-й год	0,013	0	0,01	0,009	0,08
	60-й год	0,013		0,01	0,009	0,08
^{131}I	1-й год	0,0002	0,0001	0,01	0,0008	0,05
	60-й год	0,0002	0,0001	0,01	0,0008	0,05
ИРГ	1-й год	0,48	0	0	0	0
	60-й год	0,48				

4. Обсуждение

Полученные в ходе математического моделирования результаты прогнозирования дозовых нагрузок на население в районе размещения Казахской АЭС позволяют переосмыслить традиционные подходы к организации радиоэкологического мониторинга.

Анализ данных (Рисунок 2) показывает, что основным дозообразующим радионуклидом является ^{14}C . К радиологически значимым радионуклидам можно отнести также инертные радиоактивные газы (в основном ^{88}Kr) и ^3H . Следует подчеркнуть, что вклад долгоживущего ^{137}Cs в суммарную дозовую нагрузку от стационарных радионуклидов даже по истечении 60-летнего периода работы АЭС не превышает 4 %.

Анализ результатов, представленных в таблице 2, подтверждает высокую радиоэкологическую значимость ^{14}C . Наиболее значимым вкладчиком в дозовую нагрузку на население от стационарных радионуклидов является ^{14}C в составе аграрных продуктов – растительной продукции, мясе и молоке. Третий, поступивший в сельскохозяйственную продукцию (прежде всего в растительную), также вносит заметный вклад в облучение населения.

Это подтверждает важную роль агросферы в формировании дозовой нагрузки на население при функционировании будущей АЭС. В этой связи при планировании радиоэкологического мониторинга окружающей среды в районе расположения АЭС необходимо сфокусировать внимание на РЭМ агроэкосистем.

Результаты оценки вкладов радионуклидов (Таблица 2) представлены в обобщенном виде для групп агропродуктов, объединяющих растительную продукцию, молоко и мясо. При этом в каждой группе присутствуют продукты, потребление которых обуславливает различный вклад в дозовую нагрузку от основного дозообразующего радионуклида ^{14}C . Вклады конкретных продуктов в дозу во многом определяются их долей в составе рациона питания.

Поскольку поселок Улькен расположен на берегу озера Балхаш, содержание рыбы в рационе питания местного населения может отличаться от данных (Ministry of Health of the RK, 2020). По этой причине представляется необходимым уточнить состав рациона питания населения, проживающего непосредственно в зоне расположения АЭС, с учетом реальных условий. Детальный регламент РЭМ для территории, прилегающей к планируемой Казахской АЭС, должен разрабатываться на основе оценок с использованием реальных региональных рационов питания.

Региональные особенности гидрологического режима озера Балхаш и структуры питания местного населения требуют обособленного анализа водного и пищевого путей формирования дозовых нагрузок:

•Водный путь миграции: Озеро Балхаш характеризуется выраженной гидрохимической неоднородностью: его западная часть является пресной, а восточная, вблизи которой расположен пос. Улькен, – солоноватой, с замедленным водообменом. Сброс радиоактивных веществ в водную среду в объеме $9,1 \times 10^{12}$ Бк/год (преимущественно за счет трития ^3H) в условиях высокой испаряемости и ограниченного стока в восточной части озера может приводить к локальному концентрированию трития в гидробионтах.

•Пищевой (трофический) путь: В отличие от стандартных рационов РК, для жителей побережья Балхаша характерно повышенное потребление местной рыбы (как мирных видов – сазан, вобла, так и хищных – судак, сом). Стационарный тритий, поступая в озерную воду, вовлекается в трофическую цепочку: «фитопланктон → зоопланктон → бентос/мирная рыба → хищная рыба → человек». Поскольку органически связанный тритий (ОВТ) обладает более длительным периодом полувыведения из организма человека, чем оксид трития (НТО), неучтенный в общих моделях вклад рыбной продукции может выступать значимым фактором формирования внутренней дозы облучения критической группы населения.

Для оценки возможностей РЭМ в отношении радиоэкологического контроля АЭС рассчитано содержание стационарных радионуклидов в почве и агропродукции. Удельная активность ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{131}I , ^{133}I и ^{60}Co в почве через 60 лет после ввода в эксплуатацию Казахстанской АЭС достигнет $3,3 \times 10^{-3}$, $8,3 \times 10^{-4}$, $4,1 \times 10^{-5}$, $8,5 \times 10^{-6}$ и $4,2 \times 10^{-6}$ Бк/кг соответственно. Согласно (IAEA, 2005), минимально детектируемая концентрация этих радионуклидов в почве варьирует в диапазоне 2–4 Бк/кг при массе образца 100 г. Аналогично радиоэкологическим ситуациям, описанным в (Spiridonov et al., 2025), содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве зоны влияния Казахстанской АЭС будет обусловлено глобальными выпадениями.

Таким образом, удельные активности стационарных радионуклидов в почве, а также в продукции растениеводства и животноводства, существенно ниже порога обнаружения. В этой связи идентифицировать вклад «станционной составляющей» в загрязнение продуктов питания гамма-излучающими радионуклидами не представляется возможным.

В то же время удельные активности ^{14}C и ^3H , поступающих в агропродукцию в результате работы реактора, могут быть измерены с помощью современных лабораторных методов. Удельная активность ^{14}C в молоке, мясе и растительной продукции может достигать 2,0, 6,1 и 1,9 Бк/кг. Удельная активность ^3H в этих видах продукции может составить 8,5, 6,8 и 8,3 Бк/кг соответственно. Пределы обнаружения этих радионуклидов в зависимости от наличия высокоточного оборудования и времени, потраченного на измерение, могут достигать 1–10 Бк/кг.

5. Заключение

Выполнены расчеты дозовых нагрузок на население от выбросов и сбросов планируемой Казахстанской АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200. Расчеты показали, что дозовые нагрузки на население в течение всего времени работы АЭС с этим реактором значительно ниже дозового предела и минимальной дозовой квоты для АЭС. Поскольку проведение радиоэкологического мониторинга прилегающей территории является необходимым условием функционирования АЭС, выполнены оценки, представляющие практический интерес при разработке регламента РЭМ. Анализ показал, что основными дозообразующими радионуклидами являются ^{14}C и ИРГ, в меньшей степени – ^3H .

В рамках более детализированного подхода рассчитаны парциальные дозовые нагрузки на население от стационарных радионуклидов, содержащихся в компонентах окружающей среды и агропродукции. Наиболее значимым вкладчиком в дозовую нагрузку на население является ^{14}C в составе растительной продукции, в меньшей степени – в мясе и молоке. Важным результатом данных расчетов является подтверждение ведущей роли агросферы в формировании дозовой нагрузки на население при функционировании АЭС.

С целью оценки возможностей РЭМ прилегающей территории в отношении радиоэкологического контроля АЭС рассчитано содержание стационарных радионуклидов в

почве и агропродукции. Установлено, что удельные активности стационарных радионуклидов, включенных в регламент РЭМ агроэкосистем в зоне воздействия АЭС (Guidelines 13.5.13-00, 2005), существенно ниже порога обнаружения. В то же время удельные активности ^{14}C и ^3H , поступающих в агропродукцию в результате работы реактора ВВЭР-1200, могут быть измерены с помощью современных лабораторных методов. Для реактора ВВЭР-1200 радионуклидом с максимальным содержанием в агропродукции будет ^3H . Это обстоятельство может быть учтено при разработке регламента РЭМ агроэкосистем в зоне влияния планируемой Казахской АЭС.

Следует отметить, что реальный рацион питания населения, проживающего на берегу озера Балхаш, может существенно отличаться от нормативных данных по Республике Казахстан за счет увеличенного потребления рыбы. В этой связи рекомендуется провести обследование по установлению фактического рациона питания местного населения и выполнить соответствующие расчетные оценки. В дальнейшем, при организации и проведении РЭМ после ввода Казахской АЭС в эксплуатацию, важно сочетать экспериментальные и расчетные методы (Mukusheva et al., 2026). Целесообразно рассчитывать накопление стационарных радионуклидов в компонентах ОС и агропродукции, а также оценивать радиоэкологическую значимость радионуклидов на основе фактических данных, характеризующих выбросы и сбросы АЭС.

6. Вспомогательный материал: нет вспомогательного материала.

7. Вклады авторов

Концептуализация – М.М., С.С.; методология – С.С.; программное обеспечение – Р.М.; валидация – Р.М., А.Т.; формальный анализ – С.С., М.М.; исследование – Р.М., А.Т.; ресурсы – М.М.; курирование данных – А.Т.; написание – подготовка оригинального черновика – С.С.; написание – рецензирование и редактирование – М.М.; визуализация – С.С., Р.М.; руководство – М.М.; администрирование проекта – М.М.; получение финансирования – М.М. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

8. Информация об авторе

Мукушева, Майра – д.т.н., профессор физики, директор отделения РГП НЯЦ РК в г. Астана, ул. Бейбіт атом, 2Б, Курчатов, Казахстан, 180010; mukusheva@nnc.kz, <https://orcid.org/0009-0006-8584-5978>

Спиридонов, Сергей – д.б.н., профессор, главный научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Киевское шоссе, 109 км, Обнинск, Россия, 249039; spiridonov.si@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4320-1254>

Микаилова, Рена – научный сотрудник Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Киевское шоссе, 109 км, Обнинск, Россия, 249039; renchik_vhi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1790-5319>

Топорова, Анна – магистр естествознания, начальник группы, РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», ул. Бейбіт атом, 2Б, Курчатов, Казахстан, 180010; toporova@nnc.kz, <https://orcid.org/0000-0003-1672-2959>

9. Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Агентства Республики Казахстан по атомной энергии в рамках бюджетной программы 002 «Развитие атомных и энергетических проектов» BR24792713 «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан».

10. Благодарности: нет.

11. Конфликты интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Список литературы

1. Bréchinac, F., Oughton, D., Mays, C., Barnthouse, L., Beasley, J. C., Bonisoli-Alquati, A., Bradshaw, C., Brown, J., Dray, S., Geras'kin, S., Glenn, T., Higley, K., Ishida, K., Kapustka, L., Kautsky, U., Kuhne, W., Lynch, M., Mappes, T., Mihok, S., Møller, A. P., Mothersill, C., Mousseau, T. A., Otaki, J. M., Pryakhin, E., Rhodes, O. E., Salbu, B., Strand, P., & Tsukada, H. (2016). Addressing ecological effects of radiation on populations and ecosystems to improve protection of the environment against radiation: Agreed statements from a Consensus Symposium. *Journal of Environmental Radioactivity*, 158-159, 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.03.021>
2. Ekin, A. A., Zhukovskiy, M. V., & Vasyanovich, M. E. (2016). Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP emissions (Identifikatsiya osnovnykh dozoobrazuyushchikh radionuklidov v vybrosakh AES in Russian). *Atomic Energy*, 120(2), 134-137. <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0107-x>
3. International Atomic Energy Agency. (2001). *Generic models for use in assessing the impact of discharges of radioactive substances to the environment (Safety Reports Series No. 19)*. <https://www.iaea.org/publications/6024/generic-models-for-use-in-assessing-the-impact-of-discharges-of-radioactive-substances-to-the-environment>
4. International Atomic Energy Agency. (2017). *International peer review of the environmental impact assessment performed for the licence application of the Baltic-1 Nuclear Power Plant*. <https://www.iaea.org/publications/11145/international-peer-review-of-the-environmental-impact-assessment-performed-for-the-licence-application-of-the-baltic-1-nuclear-power-plant-kaliningrad-russian-federation>
5. International Atomic Energy Agency. (2005). *Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection (Safety standards series no. RS-G-1.8)*. <https://www.iaea.org/publications/7176/environmental-and-source-monitoring-for-purposes-of-radiation-protection>
6. Fesenko, S. V., Sanzharova, N. I., Karpenko, E. I., Isamov, N. N., Kuznecov, V. K., Panov, A. V., & Cygvincev, P. N. (2021). Radioecological monitoring and its role in ensuring safety of Nuclear Power Plants (Radioekologicheskij monitoring i ego rol' v obespechenii bezopasnosti atomnykh elektrostancij in Russian). *Universities News. Nuclear Energy*, 4, 19-30. <https://doi.org/10.26583/npe.2021.4.02>
7. Guidelines 13.5.13-00. (2005). *Organization of state radioecological monitoring of agroecosystems in the zone of influence of radiation-hazardous objects (2nd edition)* (Metodicheskie ukazaniya 13.5.13-00. Organizatsiya gosudarstvennogo radioekologicheskogo monitoringa agroekosistem v zone vozdeystviya radiacionno-opasnykh ob'ektov (2-e izdanie) in Russian). https://gostassistant.ru/doc/7ac3dc38-5248-481c-8d99-c94dcbc0130c?utm_source=yandex.kz&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.kz&utm_referrer=yandex.kz
8. Karpenko, E. I., Spiridonov, S. I., & Kurtmulaeva, V. E. (2018). Estimated radiation doses to the population from exposure to routine atmospheric releases during long-term operation of the Leningrad NPP-2 (Dolgosrochnyy prognoz dozovykh nagruzok na naselenie pri shtatnykh atmosferykh vybrosakh Leningradskoy AES-2 s pomoshch'yu programmogo sredstva CROM in Russian). *Radiation and Risk*, 27(2), 20-27. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2018-27-2-20-27>
9. Kryshev, A. I., Vasyanovich, M. E., Ekin, A. A., Filatov, Y. N., & Murashova, E. L. (2020). Tritium entry into the atmosphere with emissions from NPP-VVER and population irradiation dose assessment (Postuplenie tritiya v atmosferu s vybrosami AES s VVER i otsenka dozy

- oblucheniya naseleniya in Russian). *Atomic Energy*, 128(6), 362-367. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00703-0>
10. Kryshev, A. I., Kryshev, I. I., Vasyanovich, M. E., Ekinin, A. A., Kapustin, I. A., & Murashova, E. L. (2020). Population irradiation dose assessment for ^{14}C emissions from NPP with RBMK-1000 and EGP-2 reactors (Ocenka dozy oblucheniya naseleniya ot vybroso ^{14}C AES s RBMK-1000 i EGP-6 in Russian). *Atomic Energy*, 128, 1, 53-59. <https://doi.org/10.1007/s10512-020-00650-2>
11. Kuznetsov, K. V., Panov, V. A., Sanzharova, N. I., Isamov, N. N., Andreeva, N. V., Geshel, I. V., & Sidorova, E. V. (2020). The analysis of radioecological monitoring results in the vicinity of the Kursk Nuclear Power Plant (Analiz rezul'tatov radiatsionno-ekologicheskogo monitoringa v regione razmeshcheniya Kurskoy AES in Russian). *Radiation Hygiene*, 13(2), 19-30. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2020-13-2-19-30>
12. Lipták, L., Fojčíková, E., Krpelanová, M., Chylý, M., & Čarný, P. (2019). ESTE annual impacts-system for assessment of radiological impacts of operational discharges from nuclear facilities. *Radiation Protection Dosimetry*, 186(2-3), 315-320. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz225>
13. Ministry of National Economy of the Republic of Kazakhstan. (2016). *Order of the Minister of National Economy of the Republic of Kazakhstan No. 503 of 9 December 2016 «Scientifically based physiological norms for food consumption»* (Prikaz Ministra nacional'noj ekonomiki Respubliki Kazahstan № 503 ot 9 dekabrya 2016 g. «Nauchno obosnovannye fiziologicheskie normy potrebleniya produktov pitaniya» in Russian), Astana. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1600014674>
14. Ministry of Health of the Republic of Kazakhstan. (2020). *Order of the Minister of Health of the Republic of Kazakhstan No. QR DSM-275/2020 of 15 December 2020 «On approval of the Sanitary Rules «Sanitary and Epidemiological Requirements for Ensuring Radiation Safety»* (Prikaz Ministra zdavoohraneniya Respubliki Kazahstan No. QR DSM-275/2020 ot 15 dekabrya 2020 g. «Ob utverzhdenii Sanitarnyh pravil «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k obespecheniyu radiacionnoj bezopasnosti» in Russian), Astana. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V2000021822>
15. Mukusheva, M. K., & Fesenko, S. V. (2025). *Principles and methods of organizing radiation monitoring in areas of planned Nuclear Power Plant placement* (Printsipy i metody organizatsii radiatsionnogo monitoringa v zonakh planiruemogo razmeshcheniya AES in Russian). House of Printing, Pavlodar, 198.
16. Mukusheva, M. K., Spiridonov, S. I., Mikailova, R. A., & Toporova, A. V. (2024). Comparative analysis of software tools to predict the radioecological consequences after routine and accidental emissions by NPP for the population (Sravnitel'nyj analiz programmnyh sredstv dlya prognozirovaniya radioekologicheskikh posledstvij shtatnyh i avariynyh vybrosov AES dlya naseleniya in Russian). *NNC RK Bulletin*, 1, 89-95. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-89-95>
17. Mukusheva, M. K., Spiridonov, S. I., Mikailova, R. A., & Bozhko, V. V. (2025). Predictive assessment of radiation doses to the population in the potential areas for locating the Kazakhstan NPP according to data on standard emissions from various reactor types. *Atomic Energy*, 138, 3, 189-196. <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01244-6>
18. Mukusheva, M. K., Spiridonov, S. I., Mikailova, R. A., & Toporova, A. V. (2026). *Analysis of the characteristics of radioactive emissions from Nuclear Power Plants and justification of calculation tools for predicting population radiation doses: a tutorial* (Analiz kharakteristik radioaktivnykh vybrosov AES i obosnovanie raschetnogo instrumentariya dlya prognozirovaniya doz oblucheniya naseleniya in Russian). House of Printing, Pavlodar, 188.
19. Panov, A. V., Isamov, N. N., & Kuznetsov, V. K. (2019). Radioecological monitoring in the vicinity of Rostov NPP. The analysis of results of long-term investigations (Radiatsionno-ekologicheskij monitoring v regione razmeshcheniya Rostovskoy AES. Analiz rezul'tatov

- mnogoletnikh issledovaniy in Russian). *Radiation Hygiene*, 12(2), 54-65. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2019-12-2s-54-65>
20. Robles, B., Suárez, A., Mora, J. C., & Cancio, D. (2007). *Modelos implementados en el código CROM (Código de cRiba para evaluación de iMpacto)*. Madrid. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3199.1842>
21. Spiridonov, S. I., Kuznecov, V. K., Panov, A. V., & Titov, I. E. (2019). To the question of optimisation of radioecological monitoring in the vicinity of nuclear fuel cycle enterprises (K voprosu ob optimizacii radioekologicheskogo monitoringa v regione razmeshcheniya predpriyatij yadernogo toplivnogo cikla in Russian). *Radiation and risk*, 28(4), 44-53. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-4-44-53>
22. Spiridonov, S. I., Mikailova, R. A., & Fesenko, S. V. (2023). Evaluation of the operational intervention levels for radiation protection of the public based on the emergency scenarios at Russian Nuclear Power Plants (Otsenka urovney operativnogo vmeshatel'stva dlya zashchity naseleniya na osnove stsensariy avariyn na rossiyskikh AES in Russian). *Radiation and Risk*, 32(1), 36-47. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2023-32-1-36-47>
23. Spiridonov, S. I., Mikailova, R. A., & Kuznetsov, V. K. (2025). Analysis of radioecological monitoring capabilities for assessing the impact of normalized NPP emissions on agroecosystems. *Nuclear Energy and Technology*, 11(2), 137-143. <https://doi.org/10.3897/nucet.11.161715>
24. Spiridonov, S. I., Mikailova, R. A., & Nushtaeva, V. E. (2021). About the assessment of radiation doses for the population from NPP atmospheric releases within the compliance with the dose constraint for a single facility (K voprosu ob ocnke soblyudeniya kvoty na obluchenie naseleniya ot gazoerozol'nyh vybrosov AES in Russian). *Radiation Biology. Radioecology*, 61, 6, 664-670. <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.08>
25. Vasyanovich, M. E., Ekinin, A. A., Vasilyev, A. V., Kryshev, A. I., Sazykina, T. G., Kosykh, I. V., & Kapustin, I. A. (2019). Determination of radionuclide composition of the Russian NPPs atmospheric releases and dose assessment to population. *Journal of Environmental Radioactivity*, 208-209, 106006. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106006>

Қазақстандық АЭС шығарындылары құрамындағы радионуклидтердің радиоэкологиялық маңызын бағалау

Майра Мұқышева, Сергей Спиридонов, Рена Микаилова, Анна Топорова

Аңдатпа. Жоспарланып отырған ВВЭР-1200 реактор қондырғысымен жұмыс істейтін Қазақстан АЭС-інің шығарындылары мен төгінділерінен халыққа түсетін дозалық жүктемелер есептелді. Есептеулер көрсеткендей, ВВЭР-1200 реакторымен жұмыс істейтін АЭС-ті пайдалану кезінде халыққа түсетін дозалық жүктемелер дозалық шектен және АЭС үшін ең аз дозалық квотадан әлдеқайда төмен. Жоспарланып отырған АЭС маңындағы аумақта радиоэкологиялық мониторинг (РЭМ) жүргізу регламентін әзірлеу барысында қызығушылық тудыратын есептік бағалау жүргізілді. Негізгі доза құраушы станциялық радионуклидтер ^{14}C және инертті радиоактивті газдар (ИРГ) екені, ал ^3H аз дәрежеде әсер ететіні анықталды. Қоршаған орта компоненттері мен агроөнімдердегі радионуклидтерден халыққа түсетін ішінара дозалық жүктемелер есептелді. Халыққа түсетін дозалық жүктемеге елеулі үлес қосатыны – өсімдік өнімдеріндегі ^{14}C , ал ет пен сүттегі үлесі аз. Бұл есептеулердің маңызды нәтижесі – АЭС жұмыс істеген кезде халыққа түсетін дозалық жүктемені қалыптастырудағы агросфераның жетекші рөлін растау. Іргелес аумаққа РЭМ жүргізу мүмкіндігін бағалау мақсатында топырақтағы және агроөнімдердегі станциялық радионуклидтердің мөлшері есептелді. Бірқатар станциялық радионуклидтің үлестік белсенділігі анықтау шегінен едәуір төмен екені белгілі болды. ВВЭР-1200 реакторы үшін агроөнімдерде ең көп мөлшерде

болатын радионуклид ретінде ^3H анықталды. Бұл жағдай жоспарланып отырған Қазақстан АЭС-інің әсер ету аймағындағы агроэкожүйелерге РЭМ жүргізу регламентін әзірлеу кезінде ескерілуі мүмкін.

Түйін сөздер: АЭС; ВВЭР-1200 реакторы; халықтың сәулелену дозалары; дозалық критерийлер; радиациялық әсер ету индекстері; доза түзетін радионуклидтер; тиімді доза.

Assessment of the radioecological significance of radionuclides contained in emissions from the Kazakhstan Nuclear Power Plant

Maira Mukusheva, Sergey Spiridonov, Rena Mikailova, Anna Toporova

Abstract. Dose loads on the population from emissions and discharges from the planned Kazakhstan Nuclear Power Plant (NPP) with a VVER-1200 reactor were calculated. The calculations showed that the dose loads on the population during the entire operation of the NPP with a VVER-1200 reactor are significantly lower than the dose limit and the minimum dose quota for the NPP. Estimates were prepared that are of interest in developing regulations for radioecological monitoring (REM) for the territory adjacent to the planned NPP. It was established that the main dose-forming radionuclides at the plant are ^{14}C and inert radioactive gases (IRGs), and to a lesser extent ^3H . Partial dose loads on the population from radionuclides contained in environmental components and agricultural products were calculated. The most significant contributor to the population's radiation dose is ^{14}C in plant products, and to a lesser extent in meat and milk. These calculations confirm the leading role of the agricultural sector in determining the population's radiation dose during NPP operation. To assess the capabilities of the radiological monitoring of the adjacent territory, the concentrations of plant radionuclides in soil and agricultural products were calculated. It was found that the specific activities of several plant radionuclides are significantly below the detection threshold. For the VVER-1200 reactor, the radionuclide with the highest concentration in agricultural products will be ^3H . This should be considered when developing regulations for radiological monitoring of agroecosystems in the zone of influence of the planned Kazakhstan NPP.

Keywords: Nuclear Power Plant; VVER-1200 reactor; population radiation doses; dose criteria; radiation exposure indices; dose-forming radionuclides; effective dose.