



ОЦЕНКА РАДИАЦИОННО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ УРАНОВОГО ПРОИЗВОДСТВА УЗБЕКИСТАНА И ОБОСНОВАНИЕ МЕР РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Ахмедова Н. ¹[0009-0008-3432-3664], Хунаров А. ²[0009-0000-3618-5463]

¹Филиал национального исследовательского технологического университета
«МИСИС» в г. Алмалык, PhD, доцент,
E - mail: nazira.akhmedova.68@bk.ru

²Алмалыкский государственный технический институт, доцент,
E-mail: xunarovabduvaxob@gmail.com

Аннотация. В статье изложены результаты систематизации радиационно-дозиметрических наблюдений на техногенных объектах уранового производства. Основное внимание уделено оценке мощности эквивалентной дозы гамма-излучения, эквивалентной равновесной объемной активности радона и объемной активности долгоживущих альфа-нуклидов в воздухе. Показано, что перечисленные показатели формируют информационную основу для расчета годовой эффективной дозы персонала, а также для оценки возможного воздействия промышленных площадок на прилегающие населенные пункты.

По материалам наблюдений 2011–2019 гг. установлено, что повышенные значения радиационных факторов имеют преимущественно локальный характер и фиксируются вблизи источников загрязнения. В контрольных точках населенных пунктов расчетные дозы остаются ниже установленных нормативных ограничений. Предложен комплекс организационных и инструментальных мер, направленных на повышение надежности мониторинга и снижение радиационного риска.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, урановое производство, мощность эквивалентной дозы, радон, ЭРОА, долгоживущие альфа-нуклиды, годовая эффективная доза, индивидуальная дозиметрия, техногенный объект.

Annotatsiya. Maqolada uran ishlab chiqarishining texnogen obyektlarida olib borilgan radiatsion-dozimetrik kuzatuvlar natijalari umumlashtirilgan. Tashqi gamma-nurlanishning ekvivalent doza quvvati, radonning ekvivalent muvozanatli hajmiy faolligi hamda havodagi uzoq yashovchi alfa-nuklidlarning hajmiy faolligi tahlil qilingan. Ushbu ko'rsatkichlar xodimlarning yillik samarali dozasini hisoblash va sanoat maydonlarining yaqin aholi punktlariga ta'sirini baholash uchun muhim axborot bazasini yaratadi.

2011–2019 yillardagi kuzatuvlar radiatsion omillarning yuqori qiymatlari asosan ifloslanish manbalariga yaqin hududlarda shakllanishini ko'rsatdi. Aholi punktlaridagi nazorat nuqtalarida hisoblangan dozalar me'yoriy cheklavlardan past bo'lib, maqolada monitoring samaradorligini oshirish bo'yicha chora-tadbirlar taklif etilgan.

Kalit so'zlar: radiatsion monitoring, uran ishlab chiqarish, ekvivalent doza quvvati, radon, EROA, uzoq yashovchi alfa-nuklidlar, yillik samarali doza, individual dozimetriya, texnogen obyektlar.

Abstract. The paper summarizes radiation and dosimetric monitoring data obtained at technogenic facilities of uranium production. The study focuses on gamma dose rate, equilibrium equivalent radon concentration and volumetric activity of long-lived alpha-emitting radionuclides in air. These indicators provide a basis for calculating the annual effective dose to personnel and for assessing potential exposure in nearby settlements.

The monitoring data for 2011–2019 demonstrate that elevated radiation factors are mainly local and are associated with areas close to contamination sources. Calculated doses in observation points of settlements remain below regulatory limits. A set of monitoring and preventive measures is proposed to improve radiation safety management.

Keywords: radiation monitoring, uranium production, gamma dose rate, radon, equilibrium equivalent concentration, long-lived alpha radionuclides, annual effective dose, individual dosimetry.



Введение

Безопасная эксплуатация объектов уранового производства невозможна без регулярного контроля радиационной обстановки [2, 3, 4, 5]. В таких условиях потенциальную опасность создают не только источники внешнего гамма-излучения, но и радон, продукты его распада, а также аэрозольные частицы, содержащие долгоживущие альфа-активные нуклиды. Совокупное действие этих факторов определяет фактическую дозовую нагрузку на персонал и служит основанием для выбора защитных мероприятий.

Практика радиационного контроля показывает, что отдельное измерение одного показателя не дает полной картины риска [6, 7]. Например, низкий уровень гамма-фона не исключает повышенной ингаляционной дозы при накоплении радона или радиоактивных аэрозолей. Поэтому для техногенных урановых объектов наиболее рациональным является комплексный подход, в котором данные инструментального контроля, индивидуальной дозиметрии и расчетной оценки годовых доз рассматриваются совместно.

Актуальность исследования связана с необходимостью научно обоснованной оценки радиационных факторов на промышленных площадках, в санитарно-защитных зонах и в населенных пунктах, расположенных вблизи объектов уранового производства. Цель работы состоит в переработке и обобщении результатов мониторинга МЭД, ЭРОА радона и ДАН в воздухе с последующей оценкой годовой эффективной дозы и разработкой предложений по совершенствованию радиационной безопасности.

Материалы и методы

Исходными материалами послужили результаты радиационно-дозиметрических наблюдений, выполненных на промышленных площадках, в пунктах наблюдения, санитарно-защитных зонах, на территориях хвостохранилищ и участках подземного выщелачивания урана. Наблюдения охватывали показатели, характеризующие как внешнее, так и внутреннее облучение.

Мощность эквивалентной дозы гамма-излучения в исходных исследованиях определялась дозиметром-радиометром ДКС-96 с блоком детектирования БДПГ-96. Для актуализации приборной базы и повышения оперативности полевого контроля при повторных обследованиях целесообразно использовать современные модульные дозиметры-радиометры ДКС-96/ДКС-96М, МКС-АТ1117М с блоками детектирования серии БДКГ, а также малогабаритные приборы МКС-17Д «Зяблик» и МКС-АТ6130А, позволяющие измерять мощность амбиентного эквивалента дозы, выполнять поиск источников ионизирующего излучения и проводить оперативный контроль загрязненных участков.

Для измерения ЭРОА радона применялся альфа-радиометр РАА-20П2 с приставкой «Поиск», обеспечивающий регистрацию дочерних продуктов распада радона. В современных системах мониторинга данный участок контроля может быть дополнен прибором SARAD EQF 3300 для одновременной регистрации радона, торона и продуктов их распада, а также детектором DURRIDGE RAD7 для экспресс-измерений объемной активности радона и торона в воздухе, воде и почвенном газе.

Объемная активность долгоживущих альфа-нуклидов в аэрозолях воздуха определялась после отбора проб на фильтры АФА-ВП-20 с использованием сцинтилляционного альфа-радиометра «Прогресс-АР». При переходе к непрерывному контролю воздушной среды перспективно применение аэрозольных



мониторов Mirion iCAM Mobile, iCAM-HD и iCAM GA, обеспечивающих регистрацию альфа- и бета-активности аэрозолей в режиме реального времени с компенсацией влияния радона/торона. Индивидуальные дозы персонала контролировались комплексом АКИДК-302 на основе термолюминесцентных дозиметров; для современной системы индивидуального дозиметрического контроля возможно использование комплекса DOZA-TLD, OSL-дозиметров типа Landauer InLight и электронных персональных дозиметров Mirion DMC 3000 с визуальной, звуковой и вибрационной сигнализацией превышения установленных уровней дозы и мощности дозы.

Для исключения случайной интерпретации результаты анализировались по группам наблюдений: промышленные объекты, прилегающие населенные пункты и рабочие места персонала. Такой подход позволяет сопоставлять уровни радиационных факторов с удаленностью от источников загрязнения и оценивать, выходит ли техногенное влияние за пределы производственной территории (табл.1).

Таблица 1.

Система контролируемых показателей радиационной безопасности

Показатель	Что характеризует	Основной источник формирования	Практическое назначение
МЭД	Интенсивность внешнего гамма-излучения	Радиоактивные материалы, хвосты, загрязненные участки	Выявление зон с повышенным гамма-фоном
ЭРОА радона	Риск внутреннего облучения от радона и продуктов распада	Хвостохранилища, технологические площадки, участки ПВ урана	Оценка ингаляционной составляющей дозы
ДАН	Активность долгоживущих альфа-нуклидов в аэрозолях	Пылеобразование и перенос загрязненных частиц	Контроль аэрозольного радиационного воздействия
Индивидуальная доза	Фактическую дозовую нагрузку работника	Совокупность производственных факторов	Персональный дозиметрический учет

Суммарная годовая эффективная доза рассматривалась как сумма вкладов основных радиационных факторов:

$$\begin{aligned}
 E\Sigma &= E\gamma + ERn + E\alpha + EH_2O \\
 E\gamma &= 6,1 \cdot 10^{-6} \cdot (P\gamma - Pф) \cdot T \\
 ERn &= 2,29 \cdot 10^{-10} \cdot (CRn - CRn,ф) \cdot T \\
 E\alpha &= 3,18 \cdot 10^{-2} \cdot T \cdot [(C_1 - P_1 \cdot C_2) - (1 - P_1) \cdot C_3] \\
 EH_2O &= 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot Cw \cdot Vw
 \end{aligned}$$

где $E\Sigma$ - суммарная годовая эффективная доза; $E\gamma$, ERn , $E\alpha$ и EH_2O - дозовые вклады внешнего гамма-излучения, радона, долгоживущих альфа-нуклидов и питьевой воды; T - время пребывания; $P\gamma$ и $Pф$ - измеренное и фоновое значения мощности дозы; C - объемная активность соответствующих радионуклидов.



Результаты и их обсуждение

Анализ пространственного распределения МЭД показывает, что наиболее заметное техногенное влияние проявляется вблизи источников загрязнения. В удаленных точках и населенных пунктах значения, как правило, приближаются к фоновым уровням. Это указывает на локальный характер воздействия и подтверждает необходимость более частого контроля именно на промышленных площадках, где присутствуют технологические источники радиоактивного загрязнения.

Таблица 2.

Диапазоны ЭРОА радона в населенных пунктах и на промышленных объектах

№	Территория наблюдения	Населенный пункт, Бк/м ³	Промышленный объект, Бк/м ³	Оценочная характеристика
1	Зафарабад	0,5-3,6	3,6-19	Выраженное различие между зонами
2	Навои	1,8-3,6	5-24	Промышленная зона выше фоновых точек

По данным таблицы 2, в населенных пунктах ЭРОА радона изменяется в пределах 0,5–3,6 Бк/м³, тогда как на промышленных объектах максимальные значения достигают 28 Бк/м³. Полученная разница подтверждает, что радоновая составляющая радиационного риска наиболее значима непосредственно в производственных зонах, а не в жилой застройке. Вместе с тем даже при отсутствии превышений данный фактор требует постоянного наблюдения, поскольку концентрация радона может изменяться под влиянием вентиляции, влажности, температуры, состояния грунтов и технологической активности (табл.3).

Таблица 3.

Обобщенная динамика объемной активности ДАН в пунктах наблюдения

Год	Число точек	Минимум, мБк/м ³	Максимум, мБк/м ³	Среднее значение, мБк/м ³	Интерпретация
2023	10	1,48	3,61	2,55	Низкий и относительно равномерный уровень
2024	10	1,64	5,48	3,56	Наблюдается рост отдельных значений
2025	10	6,24	12,27	9,26	Требуется анализ причин повышения аэрозольной активности

Среднегодовая активность ДАН в 2025 г. выше показателей 2023-2024 гг. Такое изменение не следует автоматически трактовать как нарушение радиационной безопасности, однако оно является важным диагностическим сигналом. Возможными причинами могут быть рост пылеобразования, изменение метеорологических условий, нарушение состояния защитных покрытий, увеличение объема технологических операций либо особенности отбора проб. Следовательно, оценку ДАН целесообразно проводить не только по единичным измерениям, но и по трендам во времени.



Таблица 4.

Сопоставление радиационных факторов и расчетной годовой дозы

Объект	Категория точки	Количество точек	МЭД, мкЗв/ч	ДАН, мБк/м ³	ЭРОА, Бк/м ³	Годовая доза, мЗв/год
1	Промобъект	34	0,21-0,72	2,2-3,8	5-24	1,28-8,49
1	Населенный пункт	16	0,24-0,34	1,8-5,3	1,7-2,9	0,45-0,94
2	Промобъект	32	0,21-0,73	2,1-2,8	2,9-19	2,18-7,27
2	Населенный пункт	22	0,18-0,23	1,6-5,1	0,5-2,9	0,47-0,89

Сопоставление промышленных объектов и населенных пунктов показывает устойчивую закономерность: расчетные годовые дозы на производственных территориях выше, чем в контрольных населенных точках (табл.4). Наибольший расчетный диапазон для промышленных объектов составляет 1,28–8,49 мЗв/год, что ниже установленного предела 20 мЗв/год для персонала [1]. Для населенных пунктов максимальное значение не превышает 0,94 мЗв/год, что свидетельствует об ограниченности техногенного влияния пределами производственной зоны.

Индивидуальная дозиметрия подтверждает, что персональные дозы работников находятся ниже нормативного предела. Однако различие между группами контроля показывает, что дозовая нагрузка распределяется неравномерно. Поэтому оптимизацию радиационной защиты следует проводить адресно: по конкретным маршрутам, рабочим операциям, времени пребывания в контролируемой зоне и эффективности применяемых инженерных барьеров.

Для повышения эффективности контроля целесообразно развивать систему риск-ориентированного мониторинга. Она должна включать регулярное обновление карт радиационной обстановки, автоматизированное накопление данных, применение современных полевых дозиметров, радоновых мониторов, аэрозольных альфа-бета мониторов и электронных индивидуальных дозиметров, а также выделение приоритетных зон контроля по результатам МЭД, ЭРОА, ДАН и индивидуальной дозиметрии.

К числу практических мероприятий относятся: поддержание защитных покрытий и пылеподавления на потенциально загрязненных участках; контроль состояния хвостохранилищ; обеспечение вентиляции помещений, где возможно накопление радона; регулярная поверка средств измерений; использование средств индивидуальной защиты; сокращение времени пребывания в зонах повышенного уровня; обучение персонала правилам радиационной безопасности и документирование результатов индивидуального дозиметрического контроля.

Заключение

Проведённая комплексная оценка радиационно-дозиметрических факторов, включающая мощность эквивалентной дозы гамма-излучения, эквивалентную равновесную объёмную активность радона, объёмную активность долгоживущих альфа-нуклидов в аэрозольной фракции воздуха, а также индивидуальные дозы внешнего облучения персонала, позволяет получить объективную характеристику радиационной обстановки на техногенных объектах уранового производства.

Установлено, что повышенные значения радиационных показателей имеют преимущественно локальный характер и формируются в непосредственной



близости от технологических площадок, участков размещения радиоактивных отходов, хвостохранилищ и иных потенциальных источников радиационного воздействия.

Сравнительный анализ показал, что значения эквивалентной равновесной объёмной активности радона в промышленных зонах превышают соответствующие показатели, зафиксированные в населённых пунктах. Данное обстоятельство подтверждает значимость ингаляционного пути поступления радионуклидов и обосновывает необходимость приоритетного контроля радона и его дочерних продуктов распада на рабочих местах персонала.

Отмеченное увеличение среднегодовых значений объёмной активности долгоживущих альфа-нуклидов в 2025 г. указывает на необходимость сохранения регулярного аэрозольного мониторинга, уточнения причин изменения пылерадиационной обстановки и оценки влияния технологических, метеорологических и организационных факторов на динамику данного показателя. Расчётные значения годовой эффективной дозы персонала не превышают 8,49 мЗв/год, что ниже установленного нормативного предела для работников радиационно-опасных производств. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при соблюдении действующих требований радиационной безопасности уровень профессионального облучения персонала находится в допустимых пределах.

В целях дальнейшего снижения радиационного риска и повышения эффективности системы производственного радиационного контроля целесообразно внедрение автоматизированного учёта результатов мониторинга, цифрового картирования радиационной обстановки, оперативного анализа дозовых нагрузок и адресной оптимизации условий труда на участках с относительно повышенными значениями радиационно-дозиметрических показателей.

Список литературы

- [1] СанПиН №0193-06. Нормы радиационной безопасности и основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. Ташкент, 2006.
- [2] International Atomic Energy Agency. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014.
- [3] International Atomic Energy Agency; International Labour Office. Occupational Radiation Protection. IAEA Safety Standards Series No. GSG-7. Vienna: IAEA, 2018.
- [4] International Atomic Energy Agency. Prospective Radiological Environmental Impact Assessment for Facilities and Activities. IAEA Safety Standards Series No. GSG-10. Vienna: IAEA, 2018.
- [5] International Atomic Energy Agency; United Nations Environment Programme. Regulatory Control of Radioactive Discharges to the Environment. IAEA Safety Standards Series No. GSG-9. Vienna: IAEA, 2018.
- [6] Paquet F., Bailey M.R., Leggett R.W. et al. ICRP Publication 137: Occupational Intakes of Radionuclides: Part 3. Annals of the ICRP. 2017;46(3-4).
- [7] World Health Organization. WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective. Geneva: WHO, 2009.
- [8] Chen J. A summary of UNSCEAR evaluation on occupational exposure to ionizing radiation. Journal of Radiological Protection and Research. 2024