

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-2-112-119>
УДК 504.5:539.16

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ КЫЗЫЛОРДИНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ ДОБЫЧИ УРАНА

М. В. Краснощёрова*, И. Д. Горлачев, П. В. Харкин, О. С. Мильц, М. А. Севериненко

РГП «Институт ядерной физики» Агентства РК по атомной энергии, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: marina.k@inp.kz*

Представлены результаты гамма-спектрометрического исследования радионуклидного состава поверхностного слоя почв в районах добычи урана Кызылординской области (месторождения Северный и Южный Карамурун, Ирколь, Харасан-1 и Харасан-2), а также в прилегающих к ним населённых пунктах и сельскохозяйственных территориях. Исходя из значений удельной активности природных гамма-излучающих радионуклидов рядов урана и тория, а также калия, рассчитаны мощность поглощённой дозы в воздухе на высоте 1 м над поверхностью почвы, годовая эффективная доза внешнего облучения населения, индекс внешней радиационной опасности и показатель пожизненного канцерогенного риска. Показано, что для большинства обследованных площадок удельные активности природных радионуклидов и производные радиологические параметры находятся в пределах диапазонов, сопоставимых с глобальными средними значениями и ориентировочными уровнями, рекомендованными документами UNSCEAR и национальными санитарными нормативами. Локальный рост активности радионуклидов характерен для участков с повышенной ураноносностью и для зон непосредственного влияния уранодобывающих объектов.

Ключевые слова: Южный Казахстан, уранодобывающие предприятия, естественные гамма-излучающие радионуклиды, радиологические параметры

ВВЕДЕНИЕ

Республика Казахстан занимает одно из ведущих мест в мире по добыче урана. При этом значительная часть минерально-сырьевой базы сосредоточена в южных регионах, включая Кызылординскую область. Здесь в пределах Сырдарьинской урановорудной провинции на протяжении последних десятилетий ведётся промышленная разработка месторождений инфильтрационного типа методом подземного выщелачивания [1, 2]. Известно, что при эксплуатации урановых месторождений в окружающую среду могут поступать уран и продукты его распада, которые мигрируют по системе «атмосфера – почва – растения – пищевые продукты» и способны оказывать комбинированное радиационно-токсическое воздействие на человека и биоту [3-5]. Почва в таких районах выполняет двойную функцию: с одной стороны, она является ключевым компонентом наземных экосистем и основой аграрного производства, с другой — долговременным депо химических загрязнителей и радионуклидов [5-6]. Особую обеспокоенность вызывают участки, где горные работы и инфраструктура уранодобывающих предприятий расположены в непосредственной близости от населённых пунктов, сельскохозяйственных угодий и водных объектов, используемых местным населением [3-4]. В процессе добычи и переработки урановой руды возможны дополнительные загрязнения объектов окружающей среды естественными радионуклидами и, прежде всего, изотопом ^{238}U . Это объективно повышает экологи-

ческую значимость оценки состояния окружающей среды вблизи подобных объектов [3].

Для оценки долговременного природного и техногенного влияния мест добычи урана на экологию региона особенно информативен верхний слой почвы, в котором фиксируется характерное для данного типа почвообразующих пород содержание естественных гамма-излучающих радионуклидов рядов урана и тория, а также калия-40, и аккумулируются техногенные радионуклиды — ^{137}Cs и ^{241}Am , поступающие в результате глобальных выпадений и локальных выбросов [5, 8]. Анализ удельной активности этих радионуклидов в сочетании с расчётом производных дозиметрических и радиологических показателей (мощности поглощённой дозы в воздухе, годовой эффективной дозы внешнего облучения, индекса внешней опасности и показателя пожизненного канцерогенного риска) позволяет количественно оценить радиационную обстановку и потенциальные риски для здоровья населения [9, 10].

Схема радиоактивного распада ^{238}U включает последовательность дочерних нуклидов. Так, ^{238}U последовательно превращается в ^{234}Th , ^{234}Pa , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , далее через ^{222}Rn и короткоживущие дочерние изотопы до ^{210}Po и ^{210}Pb . В случае урановых месторождений, в течение времени жизни, газообразный ^{222}Rn может через имеющиеся в почве трещиноватости выйти на дневную поверхность. В результате радиоактивного распада ^{222}Rn ($T_{1/2} = 3,82$ сут.) через цепочку короткоживущих дочерних продуктов образуется

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ КЫЗЫЛОРДИНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ ДОБЫЧИ УРАНА

^{210}Pb ($T_{1/2} = 22$ года), который оседает в поверхностном слое почвы, что приводит к обогащению верхних горизонтов этим изотопом. Избыточное содержание ^{210}Pb по сравнению с ^{238}U в верхних горизонтах почвы часто рассматривается как индикатор дополнительного поступления радона и его дочерних продуктов из глубинных слоёв, а также как чувствительный маркер атмосферных выпадений дочерних продуктов распада ^{238}U [5, 6, 8].

Проводившиеся ранее в Кызылординской области работы по гамма-дозиметрическому обследованию населённых пунктов, оценке содержания тяжёлых металлов в почвах и радиационной обстановки в зоне влияния уранодобывающих предприятий показали мозаичный характер загрязнения: локальные аномалии концентраций элементов и уровней излучения радионуклидов чередуются с участками, где параметры остаются в пределах естественного фона [3, 4, 7]. Эти исследования подтвердили роль антропогенных факторов в формировании аномальных участков, но в ряде случаев были ограничены по числу проб и набору определяемых показателей, что затрудняет выявление пространственных закономерностей распределения радионуклидов на уровне всей провинции [3, 4, 8]. Кроме того, для уранодобывающих районов Кызылординской области ранее не проводилась комплексная оценка радиационного состояния почв с учётом дозовой нагрузки на население и расчёта пожизненного канцерогенного риска, основанного на данных гамма-спектрометрии. Вместе с тем, близость крупных населённых пунктов Шиелы и Жанакорган, пастбищ и орошаемых сельхозугодий к месторождениям Северный и Южный Карамурун, Ирколь, Харасан-1 и Харасан-2 вызывает обоснованную озабоченность местного населения и природоохранных органов возможными долгосрочными последствиями добычи урана для почвенного покрова и здоровья людей [2–4, 8, 11].

В этих условиях актуальной научной и практической задачей является комплексная оценка радиэкологического состояния почвенного покрова в районах добычи урана Кызылординской области, основанная на определении радионуклидного состава поверхностного слоя почв, ключевых радиологических параметров и сравнение их с региональным геохимическим фоном, мировыми средними уровнями и действующими ориентировочными нормативами [5, 9, 10, 12].

Целью настоящей работы является оценка радиэкологического состояния почвенного покрова территорий Кызылординской области, прилегающих к местам добычи урана, на основе определения удельных активностей природных гамма-излучающих радионуклидов рядов урана и тория, ^{40}K и техногенного ^{137}Cs , а также расчёта показателей радиационной опасности для населения и окружающей среды.

Выбор мест пробоотбора

Исследования проведены в Кызылординской области Республики Казахстан на территориях урановых месторождений Северный и Южный Карамурун, Ирколь, Харасан-1 и Харасан-2 и на прилегающих к ним территориях. Регион характеризуется резко континентальным климатом с низким уровнем атмосферных осадков, развитой аллювиально-делювиальной равниной и преобладанием песчаных и субпесчаных почв.

Для оценки радиационного состояния почв были выбраны населённые пункты, зимовки и летовки, расположенные вблизи горных отводов, а также участки вдоль потенциальных путей миграции радионуклидов, включая зоны влияния транспортировки низкоактивных отходов. Дополнительно учитывалось положение водных объектов (река Сырдарья, оросительные и сбросные каналы), способных влиять на перераспределение радионуклидов в почвенном профиле. Всего был выделен 31 объект наблюдений, в пределах которых отобрано 66 проб поверхностного слоя почвы. Выбор площадок обеспечивал представительность по типу землепользования (жилые зоны, пастбища, условно фоновые участки) и расстоянию до уранодобывающих объектов, что позволяет оха-

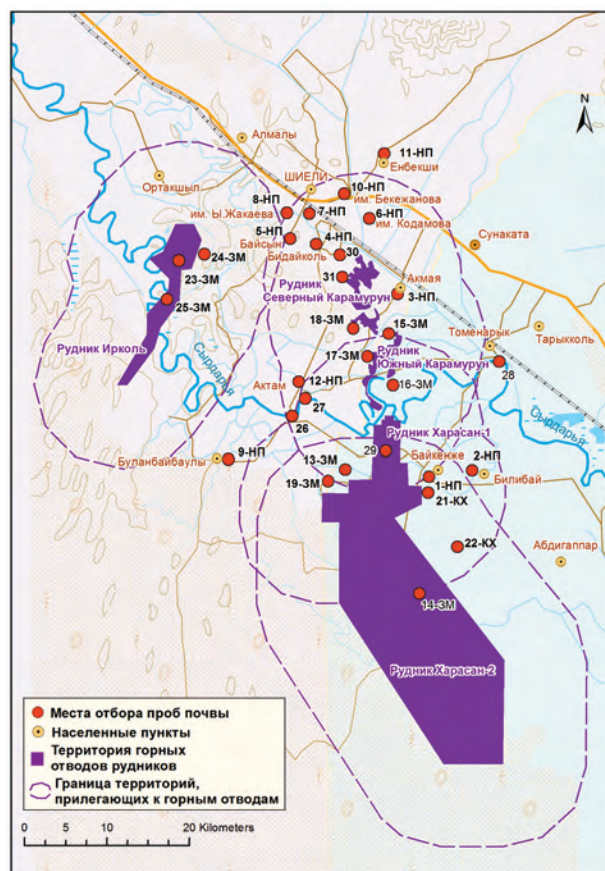


Рисунок 1. Карта-схема отбора проб

рактизовать пространственную неоднородность радиационных характеристик почвенного покрова.

Пространственное расположение месторождений, населённых пунктов и точек отбора проб представлено на рисунке 1. На карте отображены контуры горных отводов основных урановых рудников (Северный и Южный Карамурун, Ирколь, Харасан-1 и Харасан-2), границы прилегающих к ним территорий, а также сеть населённых пунктов, включая города Шиели и Жанакорган и ряд мелких сельских поселений. Круглыми маркерами обозначены места отбора почвенных проб, сгруппированные в пределах зон влияния горных отводов, вдоль основных транспортных маршрутов перевозки ураносодержащих растворов и в районах сельскохозяйственных угодий и пастбищ. Масштаб и линейка расстояний внизу карты позволяют оценить удалённость точек отбора проб от границ горных отводов и населённых пунктов (до 20 км), что используется далее при интерпретации пространственного распределения радионуклидов и индексов загрязнения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Отбор и подготовка проб почвы

Отбор проб поверхностного слоя почвы проводили с глубины 0–5 см методом «конверта» на площади 1 м² в соответствии с требованиями ГОСТ 17.4.3.01-2017, с привязкой точек к местности с использованием спутниковой навигации. Для каждой площадки формировали интегральную пробу массой не менее 1,0 кг из 3–4 отдельных проб, отобранных почвенным пробоотборником с размерами рабочей части 10×10×5 см, что позволяло снизить влияние мелкомасштабной неоднородности. Пробы помещали в хлопчатобумажные геологические мешки, маркировали, регистрировали GPS-координаты и выполняли фотодокументирование условий отбора. В лаборатории образцы высушивали при температуре (105±5) °С до постоянной массы, удаляли растительные остатки и крупные включения, затем измельчали и просеивали до фракции менее 0,075 мм для обеспечения однородности материала и воспроизводимости измерений. Подготовленные пробы помещали в герметичные цилиндрические контейнеры стандартной геометрии и выдерживали не менее 3–4 недель для установления радиационного равновесия между радием и дочерними продуктами распада уранового и ториевого рядов.

Гамма-спектрометрические измерения

Измерение удельных активностей гамма-излучающих радионуклидов в почвенных образцах выполняли методом высокоразрешающей гамма-спектрометрии. Регистрацию гамма-квантов проводили на гамма-спектрометре фирмы Canberra с широкодиапазонным германиевым детектором BeGe (диапазон регистрируемых энергий 3 кэВ–3 МэВ, энергетическое разрешение 1,8 кэВ при 1332 кэВ – линия ⁶⁰Co), обе-

спечивающим надёжную идентификацию пиков ²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K и ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb. Энергетическую калибровку и калибровку по эффективности выполняли с использованием сертифицированных стандартных образцов IAEA-RGU-1, IAEA-RGTh-1, IAEA-300, IAEA-375 и IAEA-444, а также набора точечных источников ²⁴¹Am (59,5 кэВ), ¹³⁷Cs (661,6 кэВ) и ⁶⁰Co (1173,2 и 1332,5 кэВ), перекрывающих энергетический диапазон анализируемых гамма-линий. Время измерения каждой пробы составляло не менее 12 часов, что обеспечивало минимально определяемую удельную активность порядка 0,5 Бк/кг для ²⁴¹Am и ¹³⁷Cs и 15–150 Бк/кг для ²³⁸U, ²³²Th, ²²⁶Ra, ⁴⁰K и ²¹⁰Pb в стандартной цилиндрической геометрии. Обработку спектров и расчёт удельной активности выполняли с учётом фонового излучения и поправок на эффективность детектирования в соответствии с методикой KZ 07.00.03126-2015.

Для контроля точности и воспроизводимости результатов гамма-спектрометрического анализа измеряли контрольные и дублирующие пробы, а также сертифицированные стандартные образцы почвы, содержащие гамма-излучающие радионуклиды в известных количествах. Оценку правильности проводили по расхождению между измеренными и сертифицированными значениями удельных активностей ¹³⁷Cs, ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th, ²³⁸U и ²⁴¹Am. Полученные значения совпадали с паспортной активностью стандартного образца в пределах их расширенных неопределённостей. Повторяемость определений контролировали по результатам дублирующих измерений, выполняемых не реже чем для одной пробы из 10; разброс удельных активностей для параллельных определений не превышал суммарной погрешности метода.

Расчет дозиметрических и радиологических параметров

Расчёт дозиметрических и радиологических параметров выполняли на основе удельных активностей ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K, определённых в почвенных образцах. В соответствии с рекомендациями Научного комитета Организации Объединённых Наций по действию атомной радиации (UNSCEAR) [13, 14] и документом Европейской комиссии [15] мощность поглощённой дозы D в воздухе на высоте 1 м над поверхностью земли D (нГр/ч) рассчитывается как:

$$D=0,462 A_{\text{Ra}}+0,604 A_{\text{Th}}+0,0417 A_{\text{K}}, \quad (1)$$

где A_{Ra}, A_{Th}, A_K – удельные активности ²²⁶Ra, ²³²Th и ⁴⁰K в почве, Бк/кг.

Коэффициенты 0,462; 0,604 и 0,0417 (нГр/ч на 1 Бк/кг) приняты по UNSCEAR для оценки вклада каждого радионуклида в мощность поглощённой дозы от радиоактивности грунтов.

На основе полученных значений D рассчитывается годовая эффективная доза внешнего облучения населения.

Годовая эффективная доза E (мЗв/год) определяется по формуле:

$$E = D \cdot T \cdot F \cdot 10^{-6}, \quad (2)$$

где D – мощность поглощённой дозы в нГр/ч;

$T = 8760$ ч/год – число часов в году;

$F = 0,7$ Sv/Gy – коэффициент перевода от поглощённой дозы в воздухе к эффективной дозе; множитель 10^{-6} учитывает перевод из нГр в мЗв.

Для комплексной оценки радиационной обстановки дополнительно рассчитывали индекс внешней радиационной опасности H_{ex} и показатель пожизненного канцерогенного риска ELCR [13–16].

Индекс внешней опасности H_{ex} вычисляется как:

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810}, \quad (3)$$

где A_{Ra} , A_{Th} , A_K – удельные активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K в Бк/кг;

значения 370, 259 и 4810 Бк/кг соответствуют предельным уровням удельной активности, при которых суммарная внешняя поглощенная доза не превышает рекомендованную для населения годовую эффективную дозу 1 мЗв/год для строительных материалов и грунтов [13–15].

Индекс внешней радиационной опасности H_{ex} – это безразмерный нормированный показатель, его определяют так, чтобы значение $H_{ex} = 1$ приблизительно соответствовало годовой эффективной дозе облучения населения около 1 мЗв/год от гамма-излучения этих радионуклидов. При $H_{ex} < 1$ считается, что внешняя радиационная опасность материала или грунта удовлетворяет принятым критериям радиационной безопасности, а при $H_{ex} > 1$ возможен выход за рекомендованный уровень дозы и требуется дополнительная оценка или ограничение использования такого материала/территории.

Пожизненный канцерогенный риск ELCR оценивали по выражению:

$$ELCR = E \cdot DL \cdot RF, \quad (4)$$

где E – годовая эффективная доза, Sv/год;

$DL = 70$ лет – принятая средняя продолжительность жизни;

$RF = 0,05 \text{ Sv}^{-1}$ – коэффициент радиационного канцерогенного риска для населения [16].

ELCR рассматривается как номинальный коэффициент пожизненного риска возникновения смертельных злокачественных новообразований на единицу эффективной дозы облучения, установленный Международной комиссией по радиационной защите (МКРЗ) на основе эпидемиологических данных о заболеваемости и смертности от рака в облучённых когортах.

Рассчитанные значения D , E , H_{ex} и ELCR сравнивали с ориентировочными уровнями и диапазонами, приведёнными в рекомендациях UNSCEAR и МКРЗ [13–16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Удельная активность природных и техногенных радионуклидов в почвах

Гамма-спектрометрический анализ показал, что удельная активность выбранных природных и техногенных гамма-излучающих радионуклидов в почвах исследуемой территории изменяется в пределах, приведённых в таблице 1. Средние значения активностей для всей совокупности проб составили 1,17 Бк/кг для ^{137}Cs , 614 Бк/кг для ^{40}K , 28,0 Бк/кг для ^{232}Th , 28,9 Бк/кг для ^{238}U , 26,5 Бк/кг для ^{226}Ra и 31,3 Бк/кг для ^{210}Pb .

С учётом того, что обследуемая территория расположена в зоне промышленной добычи урана, в картографическом представлении распределения радионуклидов особое внимание уделено удельной активности ^{238}U как ключевого показателя воздействия на окружающую среду. На рисунке 2 показано пространственное распределение ^{238}U в поверхностном слое почв, иллюстрирующее приуроченность участков с повышенными значениями к зонам влияния горных отводов урановых месторождений. Так, максимальные уровни ^{238}U отмечены в точках 4-НП, 5-НП, 6-НП, 7-НП, 8-НП, 29-К, 31-НП, 27-Р и 25-ЗМ,

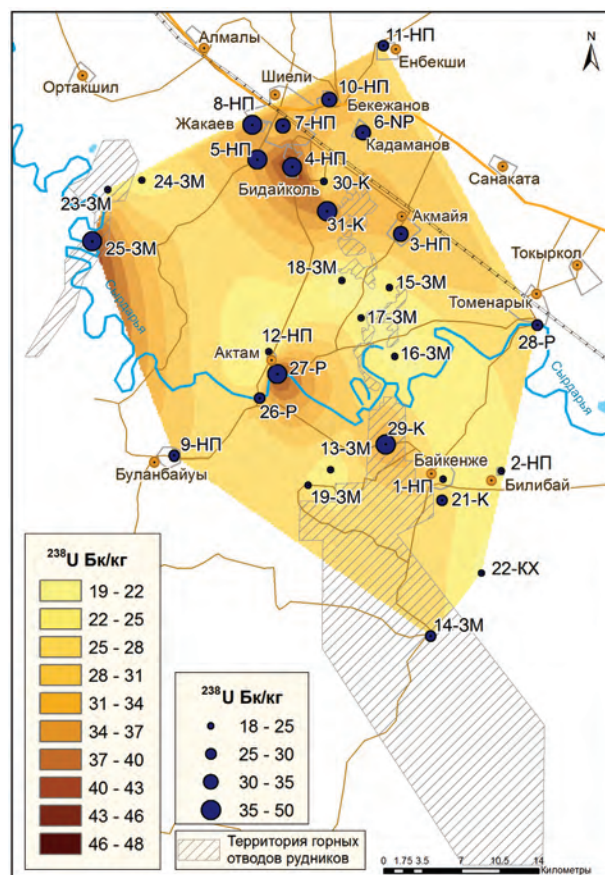


Рисунок 2. Пространственное распределение удельной активности ^{238}U в поверхностном слое почв исследуемой территории

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ КЫЗЫЛОРДИНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ ДОБЫЧИ УРАНА

Таблица 1. Удельная активность радионуклидов в почвах исследуемой территории, Бк/кг

Радионуклид	Среднее значение	Стандартное отклонение	Минимальное значение	Максимальное значение	Диапазон значений (среднее) по Казахстану [17]	Среднее мировое значение [13]
^{137}Cs	1,17	1,39	0,19	6,74		
^{40}K	614	53	487	792	100...1200 (300)	420
^{232}Th	28,0	5,8	17,3	40,0	10...220 (60)	45
^{238}U	28,9	9,1	16,1	61,3	12...120 (37)	33
^{226}Ra	26,5	4,8	17,1	34,5	12...120 (35)	32
^{210}Pb	31,3	10,3	12,8	64,4		

расположенных в непосредственной близости от границ горных отводов.

В то же время, в ряде населённых пунктов, удалённых от горных отводов (например, 1-НП), а также в зимовках (точки 15-3М и 18-3М), удельная активность ^{238}U остаётся на уровне регионального фона, что подчёркивает локальный характер загрязнения.

Как следует из таблицы 1, удельные активности ^{238}U и других природных радионуклидов в исследованных почвах находятся в диапазоне, сопоставимом со среднемировыми значениями [13, 21]. При этом расчётные значения эффективной удельной активности не превышают действующие в Республике Казахстан ориентировочные уровни радиационной без-

опасности для строительных материалов и грунтов [20]. Вклад природных радионуклидов в формирование гамма-фона в регионе является определяющим.

Техногенный радионуклид ^{137}Cs в почвах рассматриваемой территории в основном является продуктом глобальных выпадений, связанных с атмосферными ядерными испытаниями и крупными авариями на ядерных объектах. Он может использоваться как маркер долговременной аккумуляции техногенных выпадений в регионе. Стандартные отклонения, а также минимальные и максимальные значения цезия (таблица 1) указывают на наличие незначительных вариаций активности между площадками, но без выхода за пределы диапазонов, публикуемых для фоновых или слабо затронутых глобальными выпадениями территорий аридных и семиаридных регионов, где активность ^{137}Cs в поверхностном горизонте, как правило, варьирует от единиц до первых десятков Бк/кг [12-14].

В районах, прилегающих к уранодобывающим объектам, средние активности ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K несколько выше, чем на условно фоновых участках, тогда как в большинстве населённых пунктов они сопоставимы с региональным фоном.

Соотношение удельных активностей ^{210}Pb и ^{238}U в почвах

Важной характеристикой радионуклидного состава почв исследуемой территории является соотношение удельных активностей ^{210}Pb и ^{238}U . В условиях радиоактивного равновесия в цепочке распада ^{238}U активности этих изотопов в почве должны быть приблизительно равны.

На рисунке 3 показано пространственное распределение отношений удельных активностей $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ в поверхностном слое почвы исследуемой территории. Как следует из рисунка 3, для части отобранных проб наблюдаются превышения удельной активности ^{210}Pb по сравнению с ^{238}U , причём в ряде точек удельная активность ^{210}Pb вдвое превышает активность ^{238}U . Наиболее вероятной причиной такой ситуации является миграция в грунте газообразного промежуточного продукта распада ^{238}U — ^{222}Rn . Благодаря сравнительно большому периоду полураспада (~3,8 суток) радон способен диффундировать и выноситься по трещинам и поровым каналам в верхние горизонты, где его дочерние продукты распада, в том числе ^{210}Pb , фикси-

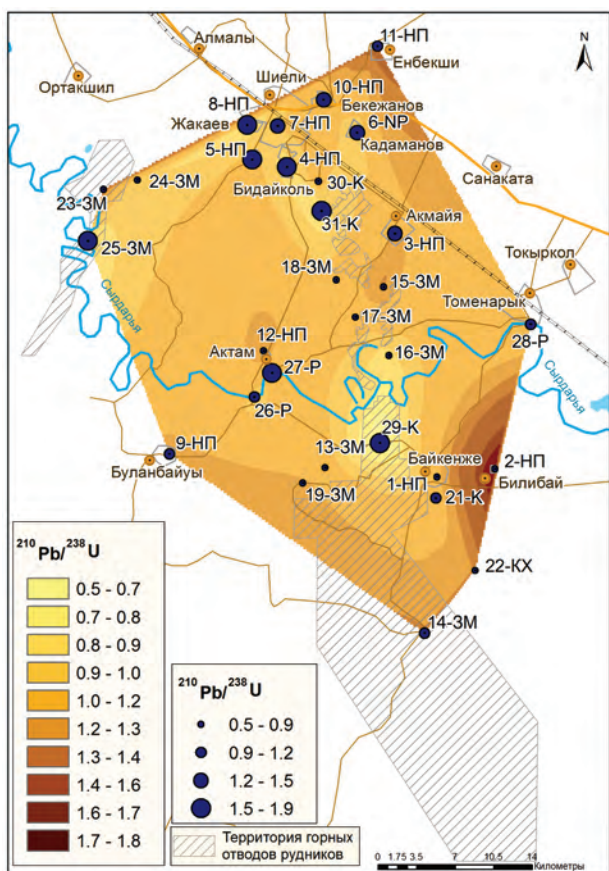


Рисунок 3. Пространственное распределение отношения удельных активностей $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ в поверхностном слое почвы исследуемой территории

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ КЫЗЫЛОРДИНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ ДОБЫЧИ УРАНА

руются в поверхностном слое почвы. В результате удельная активность ^{210}Pb в ряде точек оказывается выше, чем ожидаемая при простом радиационном равновесии с ^{238}U .

Это наглядно проявляется в распределении отношения $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ по точкам отбора. Наиболее высокие значения зафиксированы в точках 8-НП, 5-НП, 31-К, 27-Р и 29-К, расположенных в пределах пахотных земель и техногенно нарушенных участков вблизи отвальных территорий рудников, тогда как в точках 17-3М, 18-3М, 23-3М, 24-3М и 1-НП, приуроченных к слабо нарушенным и условно фоновым территориям, отношение остаётся близким к единице. Подобное пространственное распределение хорошо согласуется с картой содержаний ^{238}U (рисунок 2) – области повышенных значений отношения $^{210}\text{Pb}/^{238}\text{U}$, как правило, совпадают с урановыми максимумами или примыкают к ним, что указывает на генетическую связь изотопов ^{210}Pb и ^{238}U .

Радиологические параметры и оценка дозовой нагрузки

Для всех 66 проанализированных почвенных проб были рассчитаны значения мощности поглощённой дозы, годовой эффективной дозы, индекса внешней радиационной опасности и показателя пожизненного канцерогенного риска.

Рассчитанные, исходя из удельных активностей природных радионуклидов, значения мощности поглощённой дозы в воздухе D на высоте 1 м над поверхностью земли по формуле (1) демонстрируют умеренную вариацию между исследованными площадками (таблица 2).

Средние значения D находятся в диапазоне 50...60 нГр/ч, что сопоставимо с глобальными средними величинами для территорий с естественной радиоактивностью почв, приведёнными в докладах UNSCEAR [13-14]. На отдельных участках, приуроченных к уранодобывающим объектам, фиксируются несколько более высокие мощности доз (до 68 нГр/ч), однако и в этих случаях расчётные значения остаются в пределах характерного интервала для ураноносных районов – приблизительно 30...100 нГр/ч [13].

Годовые эффективные дозы внешнего облучения E для разных точек пробоотбора, рассчитанные по формуле (2), лежат в диапазоне 0,27...0,41 мЗв/год при среднем значении 0,34 мЗв/год (таблица 2). Эти вели-

чины существенно ниже ориентировочного контрольного уровня 1 мЗв/год для дополнительного облучения населения, принятого международными и национальными нормативами [18-19] для территорий с естественной радиоактивностью. Таким образом, даже для площадок с максимальными значениями мощности поглощённой дозы (D), вклад внешнего гамма-облучения остаётся в пределах допустимых уровней для населения.

Индекс внешней радиационной опасности H_{ex} , рассчитанный по формуле (3), для всех исследованных проб составляет 0,24...0,38 при среднем значении 0,31 (таблица 2). Значения $H_{\text{ex}} < 1$ свидетельствуют о том, что суммарное внешнее гамма-излучение от естественных радионуклидов в почвах не превышает рекомендованных предельных величин для земельных участков и строительных материалов согласно [15]. Это указывает на отсутствие значимой дополнительной радиационной нагрузки на население, обусловленной присутствием урановых месторождений и уранодобывающих предприятий.

Пожизненный канцерогенный риск ELCR, оценённый по формуле (4) с использованием коэффициента радиационного канцерогенного риска $0,05 \text{ Sv}^{-1}$, находится в интервале $(0,95...1,46) \times 10^{-3}$ при среднем значении $1,18 \times 10^{-3}$ (таблица 2). Полученные значения не выходят за пределы диапазона $(0,5...2,0) \times 10^{-3}$, характерного для регионов с естественной или умеренно повышенной природной радиоактивностью и не указывают на существенное увеличение вероятности радиационно-обусловленных онкологических заболеваний по сравнению с глобальными оценками фоновых рисков [13-16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый гамма-спектрометрический анализ поверхностного слоя почв в районах добычи урана Кызылординской области, охватывающих месторождения Северный и Южный Карамурун, Ирколь, Харасан-1 и Харасан-2, а также прилегающие населённые пункты и сельскохозяйственные территории, позволил количественно охарактеризовать современное радиационное состояние почвенного покрова региона. Установлено, что средние удельные активности природных гамма-излучающих радионуклидов уранового и ториевого рядов, а также ^{40}K и ^{137}Cs , во всех ото-

Таблица 2. Основные дозиметрические и радиологические параметры внешнего облучения населения по результатам радионуклидного анализа проб почвы

Показатель	D , нГр/ч	E , мЗв/год	H_{ex}	$\text{ELCR} \times 10^{-3}$
Минимум	44,2	0,27	0,24	0,95
Максимум	67,8	0,41	0,38	1,46
Среднее	55,0	0,34	0,31	1,18
Глобальные средние величины для территорий с естественной радиоактивностью почв	59,0	0,41	<1	(0,5...2,0)

бранных пробах соответствуют диапазонам, типичным для регионов с естественным радиационным фоном, а локальные повышения активности ограничены участками с повышенной ураноносностью и зонами непосредственного влияния уранодобывающих предприятий.

Рассчитанные на основе экспериментальных данных мощности поглощённой дозы в воздухе, годовые эффективные дозы внешнего облучения, значения индекса внешней опасности H_{ex} и пожизненного канцерогенного риска (ELCR) в среднем не превышают рекомендуемых международными организациями и национальными нормативами уровней для территорий с естественной радиоактивностью. Средняя годовая эффективная доза внешнего облучения составляет порядка 0,34 мЗв/год, среднее значение индекса внешней опасности существенно ниже единицы, а среднее значение ELCR составляет $1,18 \times 10^{-3}$, что свидетельствует об отсутствии дополнительного риска для местного населения, связанного с присутствием в регионе ураносодержащих жил и уранодобывающих предприятий.

Полученные результаты указывают на то, что обследованные территории не испытывают значимого дополнительного радиационного воздействия, однако наличие локальных аномалий вблизи уранодобывающих объектов обосновывает необходимость продолжения регулярного мониторинга состояния объектов окружающей среды в Кызылординской области. Перспективными направлениями исследований могут быть уточнение пространственного распределения радионуклидов, учёт долговременной динамики показателей дозовой нагрузки и интеграция полученных данных в системы управления экологическими рисками в районах действующих и планируемых уранодобывающих предприятий Южного Казахстана.

Данное исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP23485997).

ЛИТЕРАТУРА

1. OECD NEA, I. A. E. A. (2007). Uranium 2007. Resources, Production and Demand ("Red Book").
2. Saifulina E. et al. Epidemiology of somatic diseases and risk factors in the population living in the zone of influence of uranium mining enterprises of Kazakhstan: a pilot study //Healthcare. – MDPI, 2023. – Т. 11. – №. 6. – С. 804.
3. Nygymanova A. S. et al. Assessment of the radiation situation in the territory of the Saumalkol village, located near the mothballed uranium mine of the North Kazakhstan region //Eurasian Journal of Physics and Functional Materials. – 2021. – Т. 5. – №. 3. – С. 174-182.
4. Aumalikova M. Impact of uranium mining on radiation levels in Kazakhstan: a case study of two major provinces //BULLETIN OF THE LN GUMILYOV EURASIAN NATIONAL UNIVERSITY. PHYSICS. ASTRONOMY SERIES. – 2025. – Т. 151. – №. 2. – С. 45-59.
5. National Research Council et al. Health effects of exposure to radon: BEIR VI. – National Academies Press, 1999. – Т. 6.
6. Бахур А. Е., Мануйлова Л. И., Овсянникова Т.М. Po-210 и Pb-210 в объектах окружающей среды. Методы определения //АНПИ. – 2009. – №. 1. – С. 29-40.
7. Mussayeva E., & Bakhtin M. (2023). Assessment of radionuclides in the "soil-plant" chain of uranium mining regions (literature review). *BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. BIOSCIENCE Series*, 142(1), 124–135. Retrieved from <https://bulbio.enu.kz/index.php/main/article/view/334>
8. Ibrayeva D. et al. Radiation situation in the territories affected by mining activities in Stepnogorsk areas, Republic of Kazakhstan: pilot study //Radiation protection dosimetry. – 2020. – Т. 189. – №. 4. – С. 517-526.
9. Annex D. et al. Sources and effects of ionizing radiation // Investigation of I. – 2000. – Т. 125.
10. Kapanadze K., Magalashvili A., Imnadze P. Distribution of natural radionuclides in the soils and assessment of radiation hazards in the Khrami Late Variscan crystal massif (Georgia) //Heliyon. – 2019. – Т. 5. – №. 3.
11. Ilbekova K. et al. Cancer incidence in a population living near radioactive waste storage of uranium mining in Stepnogorsk area, Northern Kazakhstan //Asian Pacific Journal of Cancer Prevention: APJCP. – 2024. – Т. 25. – №. 8. – С. 2685.
12. Cinelli G. et al. European atlas of natural radiation. – Publications Office of the European Union, 2019.
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations; 2000. Vol. I.
14. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes. New York: United Nations; 2010. Vol. I.
15. European Commission. Radiation Protection 112: Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities; 1999. 28 p.
16. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Annals of the ICRP. 1991; 21(1–3):1–201.
17. Гребенева О. В. и др. Исследование естественной радиоактивности почв в населенных пунктах Приаралья //Медицина труда и экология человека. – 2016. – №. 4 (8). – С. 62-68.
18. International Commission on Radiological Protection (ICRP). The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP 37(2–4). Oxford: Elsevier; 2007.
19. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Application of the Commission's Recommendations to the Protection of People Living in Long-term Contaminated Areas after a Nuclear Accident or a Radiation Emergency. ICRP Publication 111. Annals of the ICRP 39(3). Oxford: Elsevier; 2009.

**ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОГО РИСКА ОТ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ПОЧВЫ
ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ КЫЗЫЛОРДИНСКОЙ ОБЛАСТИ В РАЙОНЕ ДОБЫЧИ УРАНА**

20. Приказ МЗ РК № КР ДСМ-275/2020 от 15 декабря 2020 года «Об утверждении Санитарных правил “Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности”». Зарегистрирован в Министерстве юстиции Республики Казахстан 20 декабря 2020 года № 21822.adilet.zan

21. Saad M. H. Evaluation of the activity of ^{238}U , ^{40}K , and ^{232}Th in soil samples at Yanbu Al-Bahr City in KSA //European Journal of Applied Physics. – 2022. – Т. 4. – №. 4. – С. 33-36.

**ҚЫЗЫЛОРДА ОБЛЫСЫНДАҒЫ УРАН ӨНДІРУ АЙМАҒЫНДА ХАЛЫҚ ҮШІН ТОПЫРАҚТЫҢ
БЕТКІ ҚАБАТЫНАН ТУЫНДАЙТЫН РАДИАЦИЯЛЫҚ ҚАУІПТІ БАҒАЛАУ**

М. В. Краснопёрова*, И. Д. Горлачев, П. В. Харкин, О. С. Мильц, М. А. Севериненко

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

**Байланыс үшін E-mail: marina.k@inp.kz*

Қызылорда облысының уран өндіру аудандарында (Солтүстік және Оңтүстік Қарамұрын, Иіркөл, Хорасан-1 және Хорасан-2 кен орындары), сондай-ақ оларға іргелес елді мекендер мен ауыл шаруашылығы алқаптарында топырақтың беткі қабатының радионуклидтік құрамын гамма-спектрометриялық зерттеу нәтижелері келтірілген. Уран және торий қатарларының табиғи гамма-сәуле шығарушы радионуклидтерінің, сондай-ақ калийдің меншікті активтіліктері негізінде топырақ бетінен 1 м биіктіктегі ауадағы жұтылған доза қуаты, халықтың сыртқы сәулеленуінің жылдық тиімді дозасы, сыртқы радиациялық қауіптілік индексі және өмір бойғы қатерлі ісік қаупі есептелді. Зерттелген алаңдардың көпшілігі үшін табиғи радионуклидтердің меншікті активтіліктері мен алынған радиологиялық параметрлер Дүниежүзілік орташа мәндерге және UNSCEAR құжаттарында, сондай-ақ ұлттық санитариялық нормативтерде ұсынылған нұсқамалық деңгейлерге салыстыруға болатын ауқымда екені көрсетілді. Радионуклидтер белсенділігінің жергілікті жоғарылауы урандану деңгейі жоғары учаскелерде және уран өндіру объектілерінің тікелей әсер ету аймақтарында байқалады.

Түйін сөздер: Оңтүстік Қазақстан, уран кенінің білімдері, уран өндіруші кәсіпорындар, табиғи гамма-сәуле шығарушы радионуклидтер, радиологиялық параметрлер.

**ASSESSMENT OF RADIATION RISK FROM SURFACE SOIL TO THE POPULATION OF THE
KYZYLORDA REGION IN URANIUM MINING AREAS**

M. V. Krasnoporova, I. D. Gorlachev, P. V. Kharkin, O. S. Milts, M. A. Severinenko

RSE “Institute of Nuclear Physics” of the Agency of the RK for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan

** E-mail for contacts: marina.k@inp.kz*

The results of gamma spectrometric investigations of the radionuclide composition of the surface soil layer in uranium mining areas of the Kyzylorda region (the North and South Karamurun, Irkol, Kharasan-1 and Kharasan-2 deposits), as well as in adjacent settlements and agricultural lands, are presented. Based on the activity concentrations of natural gamma-emitting radionuclides of the uranium and thorium series and potassium, the absorbed gamma dose rate in air at a height of 1 m above ground level, the annual effective dose from external exposure to the population, the external hazard index, and the lifetime cancer risk were calculated. It is shown that, for most of the surveyed sites, the activity concentrations of natural radionuclides and the derived radiological parameters fall within ranges comparable to global average values and the reference levels recommended in UNSCEAR documents and national sanitary regulations. Local increases in radionuclide activities are confined to areas with enhanced uranium mineralization and in zones directly influenced by uranium mining activities.

Keywords: Southern Kazakhstan, uranium occurrences, uranium mining enterprises, natural gamma-emitting radionuclides, radiological parameters.