УДК 504.3:528.9:004.9(575.2-25)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-170-177

РАДИАЦИОННО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ (НА ПРИМЕРЕ г. БИШКЕКА)

Т.С. Кувшинова

Аннотация. Проведено комплексное исследование радиационной обстановки территории города Бишкека с использованием современных сцинтилляционных спектрометров. Актуальность исследования обусловлена необходимостью верификации данных о естественном радиационном фоне в условиях интенсивной урбанизации и использования строительных материалов природного происхождения без должного дозиметрического контроля. Научная новизна работы заключается в интеграции методов динамической спектрометрии с геоинформационным картированием, что позволило впервые создать детализированную цифровую модель распределения мощности дозы в масштабе города. В ходе работы была апробирована методика непрерывного трекового мониторинга с последующей визуализацией данных в геоинформационных системах. Выявлены локальные радиационные аномалии в местах массового скопления людей, связанные с облицовочным камнем, а также оценен вклад золошлаковых отходов теплоэлектроцентрали в формирование общего фона. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации системы городского экологического мониторинга.

Ключевые слова: экологическая безопасность; радиационный мониторинг; геоэкология урбанизированных территорий; ионизирующее излучение; естественные радионуклиды; сцинтилляционный детектор; геоинформационные системы; Кыргызская Республика.

ГИС-ТЕХНОЛОГИЯЛАРДЫ КОЛДОНУУ МЕНЕН УРБАНИЗАЦИЯЛАНГАН АЙМАКТАРГА РАДИАЦИЯЛЫК-ЭКОЛОГИЯЛЫК МОНИТОРИНГ ЖҮРГҮЗҮҮ (БИШКЕК ШААРЫНЫН МИСАЛЫНДА)

Т.С. Кувшинова

Аннотация. Бул макала азыркы сцинтилляциялык спектрометрлерди колдонуу менен Бишкек шаарынын аймагындагы радиациялык абалды комплекстүү изилдөөнү сунуштайт. Изилдөөнүн актуалдуулугу интенсивдүү урбанизация жана тийиштүү дозиметриялык көзөмөлү жок табигый курулуш материалдарын колдонуу шартында табигый радиациялык фон жөнүндө маалыматтарды тактоо зарылчылыгы менен шартталган. Иштин илимий жаңылыгы динамикалык спектрометрия методдорун геомаалыматтык картага түшүрүү менен интеграциялоодо турат, бул биринчи жолу шаардык масштабда дозанын кубаттуулугунун бөлүштүрүлүшүнүн деталдуу санариптик моделин түзүүгө мүмкүндүк берди. Иштин жүрүшүндө үзгүлтүксүз тректик мониторинг жүргүзүү жана кийин маалыматтарды геомаалыматтык системаларда визуалдаштыруу методикасы сыноодон өткөрүлдү. Эл көп чогулган жерлерде жасалгалоочу таштарга байланыштуу локалдык радиациялык аномалиялар аныкталды, ошондой эле жылуулук электр борборунун күл-шлак калдыктарынын жалпы фонду калыптандыруудагы салымы бааланды. Изилдөөнүн жыйынтыктары шаардык экологиялык мониторинг системасын оптималдаштыруу үчүн колдонулушу мүмкүн.

Түйүндүү сөздөр: экологиялык коопсуздук; радиациялык мониторинг; урбанизациялашкан аймактардын геоэкологиясы; ионизациялоочу нуктануу; табигый радионуклиддер; сцинтилляциялык детектор; геомаалыматтык системалар; Кыргыз Республикасы.

RADIATION AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF URBAN AREAS USING GIS TECHNOLOGIES (CASE STUDY OF BISHKEK CITY)

T.S. Kuvshinova

Abstract. This paper presents a comprehensive study of the radiation situation within the territory of Bishkek using modern scintillation spectrometers. The relevance of the study is driven by the need to verify natural background radiation data under conditions of intensive urbanization and the use of natural building materials without adequate dosimetric control. The scientific novelty of the work lies in the integration of dynamic spectrometry methods with geographic information mapping, which allowed for the first time the creation of a detailed digital model of dose rate distribution on a city-wide scale. During the research, a methodology for continuous track monitoring was tested, followed by data visualization in geographic information systems. Local radiation anomalies were identified in crowded public areas associated with facing stone, and the contribution of ash and slag waste from the thermal power plant to the formation of the overall background was assessed. The results of the study can be utilized to optimize the urban environmental monitoring system.

Keywords: environmental safety; radiation monitoring; geoecology of urbanized areas; ionizing radiation; natural radionuclides; scintillation detector; geographic information systems; Kyrgyz Republic.

Введение. Вопросы обеспечения радиационной безопасности населения регулируются действующим законодательством Кыргызской Республики и системой нормативных документов, устанавливающих требования к допустимым уровням воздействия ионизирующего излучения на человека. Основополагающим правовым актом в данной области является Закон Кыргызской Республики «О радиационной безопасности населения», определяющий организационные и санитарно-гигиенические принципы защиты человека от воздействия ионизирующего излучения [1]. Допустимые уровни радиационного воздействия и предельные дозовые нагрузки для населения регламентируются действующими гигиеническими нормативами радиационной безопасности, определяющими критерии оценки радиационной обстановки на территории населённых пунктов [2].

В условиях интенсивной урбанизации возрастает необходимость совершенствования методов радиационного мониторинга городской среды. Традиционные методы радиационного контроля, основанные преимущественно на стационарных измерениях и использовании дозиметрических приборов без спектрометрической идентификации излучения, не всегда позволяют выявлять локальные источники радиационных аномалий и проводить их детальный пространственный анализ. В связи с этим в последние годы всё более широкое распространение получают методы радиационного мониторинга, основанные на применении современных сцинтилляционных детекторов и мобильных спектрометрических систем, позволяющих проводить оперативную регистрацию параметров гамма-излучения в условиях городской среды [3].

Особый научный интерес представляют исследования радиационной обстановки в регионах Центральной Азии, где значительное влияние на экологическую ситуацию оказывает техногенное наследие горнорудной промышленности и эксплуатация урановых месторождений. В частности, в научной литературе подробно рассматриваются вопросы радиоэкологического состояния территорий, прилегающих к бывшим уранодобывающим предприятиям, а также влияние хвостохранилищ на формирование радиационного фона окружающей среды [4]. Важным источником информации о состоянии природной среды и динамике экологических процессов являются национальные статистические и экологические отчёты, содержащие комплексные данные о состоянии окружающей среды и факторах антропогенного воздействия [5].

Территория города Бишкека представляет значительный интерес с точки зрения проведения радиоэкологических исследований. Ранее проведённые исследования радиационного фона городской среды показывают, что радиационная обстановка города формируется под влиянием как природных, так и техногенных факторов, включая геологическое строение территории, состав почвенного покрова и использование строительных материалов природного происхождения [6]. Существенное влияние на распределение радиационного фона оказывают геохимические особенности ландшафта

и минеральный состав горных пород, формирующих геологическую основу территории. Согласно представлениям геохимии ландшафтов, содержание естественных радионуклидов в почвах и породах напрямую связано с геологическим строением региона и условиями формирования осадочных и магматических пород [7].

При анализе радиационной обстановки необходимо учитывать и глобальные закономерности формирования естественного радиационного фона Земли. Согласно международным оценкам, представленным в докладах Научного комитета ООН по действию атомной радиации (UNSCEAR), средние значения мощности дозы гамма-излучения на поверхности Земли варьируют в широких пределах и зависят от геологических и географических условий конкретной территории [8]. Аналогичные выводы приводятся и в ряде исследований, посвящённых оценке экологических последствий разработки урановых месторождений и накопления радиоактивных отходов на территории Центральной Азии [9].

В условиях урбанизированной среды значительное влияние на формирование радиационного фона оказывают архитектурно-строительные особенности городской застройки. Использование природного камня, гранитов, сиенитов и других горных пород в облицовке зданий и общественных объектов может приводить к формированию локальных зон с повышенной мощностью гамма-излучения. В подобных условиях возникает явление так называемой «радиационной микронеоднородности» городской среды, когда в пределах небольших территорий наблюдаются существенные различия в значениях радиационного фона.

Дополнительным фактором формирования радиационной обстановки в крупных городах является деятельность энергетического сектора. Уголь, используемый в качестве топлива на теплоэлектроцентралях, содержит природные радионуклиды уранового и ториевого рядов, которые в процессе сжигания могут концентрироваться в золошлаковых отходах. В результате такие отходы способны выступать дополнительным источником радиационного воздействия на окружающую среду, особенно в районах расположения энергетических объектов и накопления золошлаковых отвалов [10].

Современные исследования в области экологического мониторинга всё чаще основываются на применении геоинформационных технологий, позволяющих интегрировать результаты полевых измерений с пространственными данными и создавать цифровые модели распределения экологических параметров. Использование геоинформационных систем обеспечивает возможность визуализации радиационного фона, анализа пространственных закономерностей его распределения и выявления локальных аномалий на урбанизированных территориях [11]. Развитие цифровых методов экологического картографирования открывает новые возможности для комплексного анализа экологического состояния городских экосистем и повышения эффективности систем экологического мониторинга [12].

Вопросы оценки радиационного состояния природной среды и организации экологического мониторинга урбанизированных территорий также рассматриваются в ряде научных исследований, в которых анализируются методы радиационного контроля, особенности формирования радиационного фона и подходы к его пространственной интерпретации в различных природно-географических условиях [13].

Несмотря на наличие отдельных исследований радиационной обстановки на территории города Бишкека, большинство из них было выполнено с использованием традиционных дозиметрических приборов и не предусматривало комплексной интеграции спектрометрических измерений с геоинформационным анализом. В связи с этим актуальной научной задачей является разработка и апробация современных методов мобильного радиационного мониторинга, сочетающих высокоточную гамма-спектрометрию и технологии цифрового картографирования.

Целью данной работы является комплексная оценка современного радиационного фона территории города Бишкека с использованием сцинтилляционных методов детектирования и применением геоинформационных технологий пространственного анализа. В рамках исследования проведено геоинформационное картирование распределения мощности дозы гамма-излучения, а также выполнен анализ факторов, определяющих формирование радиационной обстановки в условиях урбанизированной

территории. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем экологического мониторинга и обеспечении радиационной безопасности населения.

Материалы и методы исследования. Данный раздел разделен на приборно-техническое обеспечение и методику постановки экспериментального мониторинга.

Характеристика приборной базы. Для решения задач исследования был выбран метод сцинтилляционной гамма-спектрометрии. В отличие от газоразрядных счетчиков Гейгера – Мюллера, характеризующихся высокой инерционностью и неспособностью к энергетической идентификации квантов, в работе. Для измерений использовались сцинтилляционные детекторы, широко применяемые в системах мобильного радиационного мониторинга, на базе монокристалла йодида цезия, активированного таллием – CsI(Tl). Подобные технологии широко используются в современных системах мобильного радиационного мониторинга окружающей среды [9].

Ключевые технические характеристики используемого оборудования:

- *Детектор:* сцинтилляционный кристалл на основе йодида цезия, активированного таллием (CsI(Tl)), объемом не менее 1 см³, применяемый для регистрации гамма-излучения в широком энергетическом диапазоне [9].
- *Диапазон регистрируемых энергий:* от 20 кэВ до 3,0 МэВ.
- *Чувствительность:* высокая скорость счета (до 100–250 имп/с на мкЗв/ч), что позволяет проводить измерения в движении без потери точности.
- *Интеграция:* использование сцинтилляционных спектрометров позволяет проводить измерения в режиме реального времени, что подтверждено международным опытом мониторинга урбанизированных территорий [3, 9]. Общая схема программно-аппаратного комплекса представлена на рисунке 1.

Методика пешеходной гамма-съемки и спектрометрии. Полевые исследования проводились в светлое время суток при благоприятных метеоусловиях (отсутствие значительных осадков, способствующих временному снижению фона за счет экранирования почвенного слоя влагой).

Алгоритм мониторинга включал:

1. *Выбор высоты измерения:* датчик располагался на высоте 1 метра от поверхности земли (согласно методическим указаниям по оценке эквивалентной дозы для населения).
2. *Режим сканирования:* использовался метод непрерывного профилирования (трековый режим). При обнаружении локальных максимумов (превышение фона в 2 и более раз) производилась остановка для набора качественного энергетического спектра (экспозиция от 300 до 600 секунд).
3. *Идентификация нуклидов:* с помощью встроенных библиотек изотопов и анализа пиков полного поглощения проводилось разделение вклада естественных (K-40, Th-232, Ra-226) и техногенных (Cs-137) радионуклидов.

Рисунок 1 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса для мобильного радиационного мониторинга

Полученные значения мощности дозы гамма-излучения сопоставлялись с типичными значениями естественного радиационного фона, характерными для урбанизированных территорий, приведёнными в научной литературе [11].

Технология цифрового ГИС-картирования. Научная новизна работы заключается в применении программно-аппаратного комплекса для визуализации радиационных полей. Процесс обработки (ПО) данных разделялся на три этапа:

- ***Сбор данных:*** синхронизация спектрометра со смартфоном с использованием специализированного ПО. Смартфон выполнял роль логгера, фиксируя GPS-координаты и соответствующие им значения МЭД (мощности эквивалентной дозы) с шагом в 1–2 секунды.
- ***Экспорт и фильтрация:*** геоинформационные технологии активно применяются при экологическом картировании урбанизированных территорий и анализе пространственного распределения факторов загрязнения [7]. Проводилась статистическая обработка для исключения «выбросов», вызванных ошибками позиционирования GPS в условиях плотной городской застройки.
- ***Визуализация:*** построение радиационных треков и «тепловых карт» (Heatmaps) с наложением на спутниковые подложки Google Earth и векторные карты города. Применялся метод интерполяции (IDW – метод обратных взвешенных расстояний) для создания непрерывной модели распределения радиационного фона.

Результаты и их обсуждение. В данном разделе представлены результаты мониторинга, полученные в период 2024–2025 гг., и проведена их интерпретация в сравнении с архивными данными.

Анализ фоновых показателей селитебных территорий. В ходе проведения гамма-съемки жилых массивов г. Бишкека (микрорайоны 5, 6, 7, а также южные планировочные районы) было установлено, что средние значения мощности эквивалентной дозы (МЭД) находятся в диапазоне 0,18–0,24 мкЗв/ч. Данные показатели соответствуют региональному радиационному фону и не превышают гигиенических нормативов.

Однако при детальном анализе спектрограмм была зафиксирована микронеоднородность фона, обусловленная качественным составом почвенного покрова. В южной части города значения МЭД стабильно выше на 10–15 %, что объясняется близостью к предгорным шлейфам, сложенным породами с более высоким естественным содержанием радионуклидов.

Локальные техногенно-усиленные аномалии в центре города. Наиболее значимые результаты были получены при обследовании общественных пространств, в оформлении которых использован природный облицовочный камень.

- ***Объект «На старой площади»:*** при замере у основания гранитных монументов и парапетов зафиксированы скачкообразные увеличения МЭД до 0,75–0,85 мкЗв/ч. Отсутствие пиков Цезия-137 подтверждает природный характер аномалии. Типичный аппаратный спектр гамма-излучения для данной локации приведен на рисунке 2.
- ***Идентификация источника:*** накопленный энергетический спектр выявил доминирующие пики фотофиксации, соответствующие изотопам ряда Тория-232. Данный факт подтверждает, что аномалия имеет естественный характер и связана с составом облицовочного камня.

Обобщенные данные по ключевым точкам мониторинга представлены в таблице 1.

Как видно из представленной таблицы, наиболее значительные отклонения от фоновых значений занимают строительные материалы, использованные при реконструкции центральных объектов. Они относятся ко II или III классу радиационной опасности по НРБ-99, что допустимо для наружной отделки, но требует ограничения времени пребывания персонала при проведении монтажных работ.

Влияние энергетического сектора на радиационную обстановку. Особое внимание в работе уделено зоне влияния ТЭЦ г. Бишкека. Повышение радиационного фона вблизи золоотвалов связано с концентрацией естественных радионуклидов при сжигании твердого топлива [8, 10]. Проведенные замеры в направлении преобладающей розы ветров (север, северо-восток) показали, что поверхностное

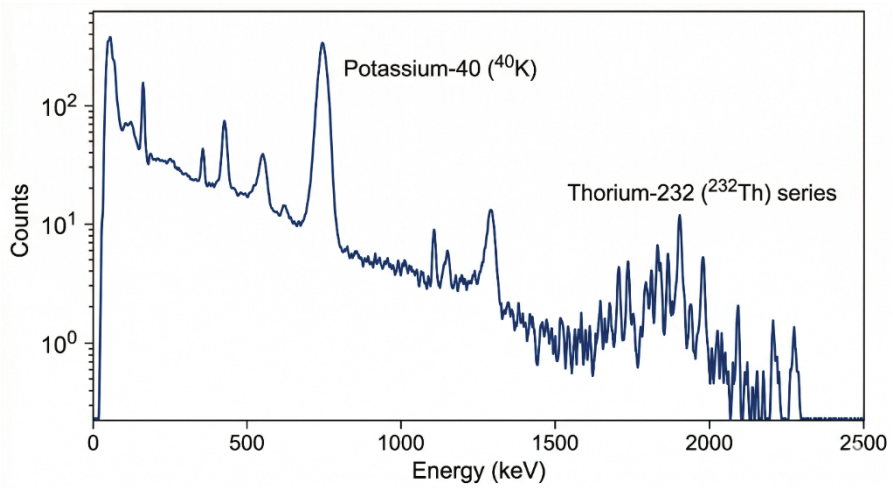

Рисунок 2 – Энергетический спектр гамма-излучения гранитной облицовки с идентификацией естественных радионуклидов

Таблица 1 – Мощность эквивалентной дозы (МЭД) гамма-излучения в различных локациях г. Бишкека (по результатам мониторинга 2024–2025 гг.)

Категория зоны	Точка замера (локация)	Тип поверхности/ Источник	МЭД, мкЗв/ч (среднее)	Превышение фона (раз)	Изотопный состав (основной пик)
Контрольная	Парк им. Панфилова	Грунт, газон	0,18–0,20	1,0 (Фон)	K-40 (калий-40)
Селитебная	7-й микрорайон	Асфальтовое покрытие	0,22	1,1	K-40, Th-232 (естественные изотопы)
Общественная	На старой площади (центр)	Плитка, бетон	0,35	1,8	Ra-226, Th-232 (техногенные примеси)
Аномальная	На старой площади (памятник)	Гранитная облицовка	0,75–0,85	4,2	Th-232 (Торий-232)
Промышленная	Район ТЭЦ (С-В сторона)	Почва (пылевой осадок)	0,32	1,6	Th-232 (Торий-232)
Транспортная	Пересечение пр. Чуй / Фучика	Пылевое накопление	0,28	1,4	K-40, Th-232 (естественные изотопы)

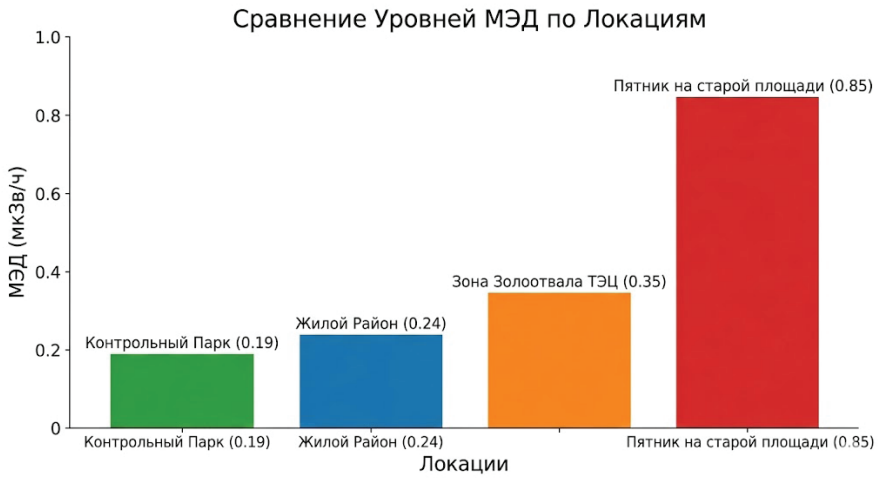

Рисунок 3 – Сравнительная характеристика уровней МЭД
в различных функциональных зонах города

загрязнение почв в радиусе 1,5 км от ТЭЦ характеризуется увеличением МЭД на 25–30 % относительно контрольных точек в экологически чистых районах.

Данный эффект связан с выпадением мелкодисперсной золы, в которой концентрация естественных радионуклидов уранового ряда выше, чем в исходном угле.

Сравнительный анализ с данными прошлых лет. Сопоставление полученных результатов с данными 2016 года (из материалов кафедры) показало, что общий радиационный фон города остается стабильным. Однако применение ГИС-технологий позволило впервые выявить границы «пятен» загрязнения, которые ранее пропускались при точечном мониторинге стационарными постами. Методика наложения радиационных треков на электронные карты города базируется на современных принципах эколого-радиационного картографирования [7, 13].

Цифровое наложение треков мониторинга на карту города наглядно демонстрирует корреляцию между транспортными узлами и зонами повышенного пылевого оседания, что открывает новые возможности для муниципального экологического планирования. Сравнительный анализ различных зон города наглядно демонстрирует значительный отрыв локальных аномалий от фоновых значений (рисунок 3).

Заключение и практические рекомендации. На основании проведенного комплексного мониторинга и цифрового картирования радиационной обстановки г. Бишкека можно сформулировать следующие выводы:

1. Стабильность общего фона. Установлено, что средние показатели радиационного фона на селитебных территориях города (0,18–0,24 мкЗв/ч) остаются в пределах нормы. Сравнение с архивными данными 2016 года подтверждает отсутствие масштабных площадных загрязнений за прошедшее десятилетие. Зафиксированные значения МЭД сопоставимы с данными мониторинга прошлых лет по г. Бишкеку [6] и соответствуют глобальным трендам, описанным в отчетах научного комитета ООН [12].

2. Выявление микроаномалий. Внедрение сцинтилляционной спектрометрии позволило зафиксировать локальные зоны радиационного дискомфорта в центре города (до 0,85 мкЗв/ч). Доказано, что их природа связана исключительно с использованием природного камня с высоким содержанием изотопов ториевого ряда, что исключает версию о техногенных утечках.

3. Эффективность цифровых методов. Апробированная методика трекового ГИС-мониторинга показала свою превосходство над традиционными точечными замерами. Она позволяет визуализировать границы распространения пылевых шлейфов от ТЭЦ и оценивать реальную дозовую нагрузку на население в динамике.

Практические рекомендации:

- *Для муниципальных служб:* рекомендуется внедрить обязательный радиологический контроль строительных и отделочных материалов (гранит, сиенит), ввозимых для реконструкции общественных пространств города.
- *Для системы мониторинга:* целесообразно создание постоянно обновляемой цифровой карты радиационной безопасности Бишкека на базе облачных ГИС-платформ.
- *Для образовательного процесса:* полученные результаты и методики могут быть интегрированы в учебные программы КРСУ как пример конвергенции ИТ-технологий и экологического мониторинга.

Поступила: 24.02.2026; рецензирована: 10.03.2026; принята: 12.03.2026.

Литература

1. Закон Кыргызской Республики «О радиационной безопасности населения» от 17 июня 1999 года № 58 (в редакции Закона КР от 26 июля 2011 года № 129).
2. НРБ-99. Нормы радиационной безопасности: Гигиенические нормативы. Бишкек: Минздрав КР, 1999. 72 с.
3. *Алёхин Ю.В.* Экологическая геология: радиационный мониторинг городских агломераций / Ю.В. Алёхин, А.А. Бурмистров // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. № 4. С. 12–19.
4. *Торгоев И.А.* Радиационная экология Майлуу-Суу / И.А. Торгоев, Ю.Г. Алёшин. Бишкек: Илим, 2009. 238 с.
5. Национальный статистический комитет КР. Отчет о состоянии окружающей среды в Кыргызской Республике за 2015–2018 гг. Бишкек: НСК КР, 2019. 156 с.
6. *Кермалиев Э.Д.* Мониторинг радиационного фона г. Бишкека: проблемы и перспективы / Э.Д. Кермалиев // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 1. С. 142–145.
7. *Петров С.В.* Использование ГИС-технологий в эколого-радиационном картировании урбанизированных территорий / С.В. Петров // Вестник КазНУ. Серия экологическая. 2021. Т. 67. № 2. С. 45–54.
8. *Макаров В.А.* Влияние угольной энергетики на радиационный фон прилегающих территорий / В.А. Макаров // Энергетика и экология. 2020. № 1. С. 88–95.
9. *Smith J., Brown L.* Application of scintillation detectors for real-time radiation mapping in urban environments // Journal of Environmental Radioactivity. 2022. Vol. 240. P. 106–115. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106745.
10. *Касимов Н.С.* Геохимия ландшафта: учебное пособие / Н.С. Касимов. М.: Академкнига, 2013. 455 с.
11. *Torgoyev I.A., Aleshin Yu.G.* Environmental impact of uranium tailings in Central Asia // Nature and Resources. 2021. No. 5. P. 112–118.
12. UNSCEAR 2020/2021 Report. Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations, 2022. 562 p.
13. *Иванов П.П.* Цифровые методы экологического картографирования / П.П. Иванов // Экология и промышленность России. 2023. № 2. С. 15–20.