

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'А.Е. Ермековна'.

Темиржанова Арай Ермековна

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ
СРЕДЫ ТЕРРИТОРИИ «ВОСТОЧНОГО СЛЕДА» СЕМИПАЛАТИНСКОГО
ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

1.6.21 – Геоэкология

Томск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель:

Язиков Егор Григорьевич

доктор геолого-минералогических наук,
профессор отделения геологии Инженерной
школы природных ресурсов

Официальные оппоненты:

Бортникова Светлана Борисовна

доктор геолого-минералогических наук,
федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт нефтегазовой
геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО
РАН, главный научный сотрудник

Московченко Дмитрий Валерьевич

Доктор географических наук, Федеральное
государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр
Тюменский научный центр СО РАН, г. Тюмень,
главный научный сотрудник

Защита состоится «06» ноября 2025 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.29 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 2а, строение 5, корпус 20, аудитория 504.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета ДС.ТПУ.29,
доктор биологических наук, профессор

A handwritten signature in blue ink, belonging to Natalya Vladimirovna Baranovskaya, positioned above the printed name.

Барановская Наталья Владимировна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. На сегодняшний день на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) выделяются три крупных зоны радиоактивных выпадений: «Южный след», «Юго-Восточный след» и «Восточный след». Эти три радиоактивные следы образовались в результате серии атмосферных ядерных испытаний, которые проводились как наземным, так и воздушным способом на площадке «Опытное поле» в период с 1949 по 1962 годы. Два следа («Южный» и «Юго-восточный») были обнаружены на местности в ходе аэрогамма-спектрометрической съемки, проведенной в 1990–1991 годах, а также в результате комплексных радиоэкологических исследований, осуществляемых Институтом радиационной безопасности и экологии НЯЦ РК с 2009 года и по настоящее время. «Восточный след» был выявлен в ходе радиоэкологического обследования территорий, прилегающих к СИП, в районе населенного пункта Долонь (Лукашенко, 2015 г).

Исследование этих зон необходимо для оценки последствий ядерных испытаний и их влияния на окружающую среду. Ведутся работы по оценке текущего уровня радиоактивного загрязнения, а также его воздействия на здоровье населения и экосистему. Однако радиация не является единственным фактором, влияющим на здоровье. Немаловажное значение имеют и химические загрязнители, такие как тяжелые металлы и токсичные элементы в почве и воздухе, которые могут существенно повлиять на состояние окружающей среды и здоровье людей. В этом контексте особое внимание стоит уделить химическому составу твердых частиц аэрозолей (PM_{2.5}, TSP), поскольку эти вещества могут содержать не только радионуклиды, но и опасные токсичные элементы. Взвешенные вещества размером менее 2.5 микрон распространяются на большие расстояния и являются потенциальными загрязнителями основных компонентов природной среды, а также легко проникают в органы человека в процессе дыхания и при наличии вредных веществ (тяжелые металлы и радионуклиды) в них может привести к тяжелым заболеваниям (Maykut et al. 2003; Sun et al., 2014; Meng et al., 2020; Zhang et al., 2022).

В этом контексте особое внимание заслуживает «Восточный след», который является наименее исследованным среди трех радиоактивных следов. Учитывая, что исследуемая территория радиоактивных выпадений — это также район расположения малого населенного пункта Долонь, возникает необходимость в комплексной оценке потенциального радиоактивного и химического загрязнения данной территории. Важно определить участки с возможной повышенной концентрацией как искусственных, так и естественных радионуклидов, а также химических элементов в почве и твердых частицах аэрозолей воздуха.

На территории СИП не существует крупных промышленных объектов, поэтому с достаточной долей уверенности можно предположить, что основным источником загрязнения является подстилающая поверхность почвы. Данные других исследований также подтверждают, что основным источником взвешенных

аэрозольных частиц в воздухе являются тонкодисперсные почвенные фракции размером менее 10 мкм (Lee et al., 2024; Nayebare et al., 2022; Van Der Does et al., 2018; Gubanova et al., 2020). Что касается территории радиационно-опасных объектов СИП, в местах с максимальными концентрациями искусственных радионуклидов в почве (эпицентры ядерных испытаний) необходимо регулярно проводить специальные исследования воздушной среды. Регулярные обследования позволят отслеживать динамику изменения концентраций как искусственных, так и естественных радионуклидов, а также химических элементов в воздухе с течением времени. Специальные исследования, в свою очередь, будут направлены на оценку масштабов распространения искусственных радионуклидов в атмосферном воздухе за пределы испытательных площадок СИП.

Степень разработанности темы. На сегодняшний день выполнен значительный объем исследований, посвященных изучению радиационной обстановки в населенных пунктах, прилегающих к границам Семипалатинского испытательного полигона (СИП), таких как Долонь, Кайнар, Саржал, Караауыл, Мостик, Майское, Егындыбулак и Чаган (Dubasov et al., 1994; Sakaguchi et al., 2006; Gusev et al., 1997; Takada et al., 1999; Ivannikov et al., 2002; Deliglasov et al., 1991; Nápoles et al., 2004; Gastberger et al., 2001; Conway et al., 2009). С применением аэрокосмических и наземных методов, включая гамма-съемку, дозиметрические измерения, а также отбор и анализ проб почвы и растительности, было обследовано более 30 тыс. км² территорий, примыкающих к границам СИП, с учетом зон воздействия радиоактивных выпадений (Yamamoto et al., 1996; Wendel et al., 2013; Beasley et al., 1998; Howard et al., 2005; Лукашенко и др., 2015; Артемьев и др., 2007).

Тем не менее, «Восточный след» радиоактивных осадков рассматривался фрагментарно — преимущественно на участках с повышенными уровнями гамма-излучения, зафиксированными в ходе пешеходной гамма-съемки, а также на территориях населенных пунктов Долонь и Мостик (Stepanenko et al., 2006; Imanaka et al., 2010; Джамбаев и др., 2019; Göksu et al., 2006; Sakaguchi et al., 2004; Sato et al., 2006; Yamamoto et al., 2008). При этом отсутствовал региональный подход к обследованию, не производился целенаправленный отбор проб компонентов природной среды вдоль условной оси распространения следа. Проведенные исследования, как правило, ограничивались оценкой текущих дозовых нагрузок, без учета пространственно-временной динамики радиационного загрязнения. Указанные обстоятельства подчеркивают необходимость более комплексного и системного подхода к исследованию данной проблематики.

Следует также отметить, что, хотя в настоящее время имеются единичные работы, посвященные изучению радионуклидного состава фракции PM_{2.5} прилегающих территории и общей пыли (Lehto et al., 2003; Lehto et al., 2006; Артемьев и др., 2003; Круглыхин и др., 2018) исследования, направленные на определение ее элементного состава, практически не проводились. Аналогичная ситуация наблюдается и в отношении компонентов природной среды вдоль

рассматриваемого профиля, для которых также отсутствуют данные по элементному составу.

Объектом исследования выступают компоненты природной среды (фракции твердых частиц аэрозолей воздуха $TSP \geq 40$ мкм, $PM \leq 2.5$ мкм, почвенный и снеговой покровы), а предметом исследования - радионуклидный и элементный составы компонентов природной среды.

Цель работы: оценить эколого-геохимическую обстановку в зоне воздействия «Восточного следа» Семипалатинского испытательного полигона по данным изучения состава фракций твердых частиц аэрозолей воздуха, почвенного и снегового покровов.

В соответствии с целью исследования были поставлены следующие **задачи**:

1. Оценить уровни накопления естественных и техногенных радионуклидов, макро-, микроэлементов и их отношений в почвенном покрове регионального профиля в зоне воздействия «Восточного следа» СИП, протяженностью 140 км от эпицентра взрыва.

2. Определить объемную активность радионуклидов, концентрацию элементов в различных фракциях твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP , $PM_{2.5}$) испытательной площадки «Опытное поле» СИП.

3. Изучить изменчивость среднемесячных концентраций элементов в составе $PM_{2.5}$ на территории малого населенного пункта Долонь, расположенного на расстоянии 80 км от испытательной площадки СИП в зоне воздействия «Восточного следа», в неотапливаемый и отопительный периоды.

4. Изучить особенности элементного состава твердого осадка снега и почвенного покрова на территории населенного пункта Долонь.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертационной работы положены материалы исследований при личном участии автора в период работы в Институте радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан с 2015 г. по 2021 г. Работы частично выполнялись в рамках научно-технической программы Республики Казахстан «Комплексное радиоэкологическое исследование населенных пунктов Большая Владимирка, Канонерка и прилегающих территорий (40 км^2)» по разделу «Оценка загрязнения тяжелыми металлами атмосферного воздуха» (2014–2016 гг.), а также научно-технической программы «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан» (ИРН BR09158470), тема 04.01 «Разработка методологии комплексной оценки состояния воздушного бассейна в зоне влияния объектов ЯТЦ» (2021–2023 гг.) при сотрудничестве персонала отдела аналитических исследований лаборатории элементного анализа «Института радиационной безопасности и экологии» РГП Национального ядерного центра Республики Казахстан.

При личном участии автора всего отобрано 86 проб твердых частиц аэрозолей воздуха ($PM_{2.5}$). Места отбора проб – стационарный пост Института радиационной безопасности и экологии, расположенный по адресу ул. 25-летия Октября

населенного пункта Долонь и стационарный пост, расположенный в г. Курчатов. Методом шурфа отобрано 30 объединенных проб снега с территории населенного пункта Долонь, а летом 2015 года - были отобраны 30 проб почвы. По профилю 140 км «Восточный след» отобраны 14 образцов почвы с поверхностного слоя (0-5 см). С внешних границ испытательной площадки «Опытное поле» отобраны 12 проб твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP), 12 проб мелкодисперсных проб аэрозолей (PM2.5), по 3 пробы TSP и PM2.5 с поста 5 (г. Курчатов) и соответственно произведен сопряженный отбор проб почвы (5 объединенных проб). Также были проанализированы пробы угля (10 проб) и золы (10 проб), используемые жителями населенного пункта Долонь в качестве основного топлива.

Подготовка проб компонентов природы (почва, твердые частицы аэрозолей воздуха, снег, уголь) осуществлялись автором в соответствии с нормативно-методическими документами и утвержденными методическими указаниями, а также рабочими инструкциями. Аналитические методы включают - метод масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП) (Agilent 7700x «Agilent Technologies»), атомно-эмиссионную спектрометрию с ИСП (ICAP 6000 Duo «Thermo Scientific»), методы альфа-, бета- и гамма-спектрометрии (AlphaAnalyst 7200-12 с PIPS детекторами, Quantulus 1220 с фотоэлектронным умножителем, BE3830 коаксиальным ОЧГ (особо чистый германий) детектором). Также были выполнены исследования на базе МИНОЦ им. Л.П. Рихванова «Урановая геология» НИ ТПУ с применением методов растровой сканирующей электронной микроскопии (модель Hitachi S3400N с ЭДС-приставкой Bruker XFlash 4010) и рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр Bruker D2 Phaser).

По полученным результатам производился расчет эколого-геохимических показателей, таких как коэффициент концентрации (K_c), кларк концентрации (K_k) (Григорьев, 2009), суммарный показатель загрязнения (Z_c) (Сае, 1990), а также индекс геоаккумуляции (I_{geo}) (Müller, 1969), для твердых частиц аэрозолей воздуха: коэффициент обогащения (EF), отражающий степень антропогенного влияния на воздушную среду (Soto-Jiménez et al., 2003; Das et al., 2015), для образцов угля и золы применялись специальные геохимические индексы: кларк концентрации в углях (K_{k_y}) (Dai et al., 2015) и индекс сродства к углю (CAI — Coal Affinity Index), отражающий степень избирательного накопления микроэлементов в угленосной материи (Юдович и Кетрис, 2015). Статистическая обработка результатов производилась с использованием программ Microsoft Excel и ПО «Statistica» (Михальчук, Язиков, 2015). Построение карта-схем осуществлялось в ПО «ArcGIS» с дополнительными модулями Geostatistical Analyst и инструментами Xtools (ArcGIS 10.8 for Desktop).

Научная новизна работы: 1) впервые выделены три (ближняя, средняя, дальняя) зоны воздействия «Восточного следа» СИП от эпицентра взрыва до 140 км по уровням удельной активности техногенных радионуклидов ($^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am) относительно фона глобальных выпадений, отношений $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ и накопления

редкоземельных элементов в почвенном покрове; 2) впервые установлена специфика фракционного состава ($TSP \geq 40$ мкм, $PM \leq 2.5$ мкм) микроэлементов в твердых частицах аэрозолей воздуха на испытательной площадке «Опытное поле» СИП; 3) впервые изучена сезонная динамика концентраций химических элементов в $PM_{2.5}$ в неотопительный и отопительный периоды в 80 км от эпицентра взрыва на территории СИП (населенный пункт Долонь); 4) впервые выявлены особенности пространственного распределения микроэлементов на территории населенного пункта Долонь в снеговом и почвенном покровах.

Теоретическая значимость обусловлена следующим: результаты исследования вносят весомый вклад в концепцию устойчивого развития регионов и функционирования природно-технических систем с разработкой научных основ организации геоэкологического мониторинга.

Практическая значимость заключается в использовании полученных данных для мониторинга состояния окружающей среды в районе профиля «Восточный след» Семипалатинского испытательного полигона и прогноза экологической обстановки в регионе филиалом по Восточно-Казахстанской и Абайской областям Департамента экологического мониторинга Республиканского государственного предприятия «Казгидромет» и разработки рекомендаций по охране и рациональному использованию природных ресурсов и планирования хозяйственной деятельности на территории полигона и прилегающих районах с учетом экологических факторов для Департамента экологии по области Абай Комитета экологического регулирования и контроля Министерства экологии и природных ресурсов РК.

Научные положения, выносимые на защиту

Первое положение. В пределах регионального профиля «Восточный след» СИП выделяются эпицентр взрыва, ближняя (до 60 км), средняя (80-110 км) и дальняя (120-140 км) зоны воздействия по уровням удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ (выше глобальных выпадений в 28, 5, 2 и 6 раз, соответственно), ^{241}Am (выше глобальных выпадений в 12, 4 (ближняя) и 3 раза (дальняя)), отношений $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ (11,6; 6,1 (ближняя); 9,2 (дальняя)), концентрации легких лантаноидов в образцах почвы эпицентральной зоны (La, Ce, Pr, Nd, Sm) выше условного фона от 5 до 17 раз, тяжелых лантаноидов (Eu, Gd, Dy, Tm, Yb, Lu) – от 2 до 12 раз в почвенном покрове.

Второе положение. Для крупнодисперсных фракций твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP) на испытательной площадке «Опытное поле» СИП выявлены элементы с различными коэффициентами обогащения: ≥ 10 - Cu, Sr, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Pb, U; ≥ 100 - Ba, Eu; ≥ 1000 - Zn, тогда как для мелкодисперсной фракции аэрозолей ($PM_{2.5}$): ≥ 10 - Sr, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Eu, Pb и U относительно почв площадки СИП. Отличительной особенностью при этом крупнодисперсной фракции является отношение Ce/Eu более 4, при фоне 59 ед.

Третье положение. В составе твердых частиц аэрозолей воздуха ($PM_{2.5}$) на территории населенного пункта Долонь выявлены элементы индикаторы: для

неотопительного периода - Cr, Mn, Th и группа редкоземельных элементов (La, Pr, Nd, Sm), для отопительного - Be, Co, Ge, Cd, Bi, причем установлены элементы, присутствующие в составе аэрозолей постоянно, это - Mg, As, Rb, Sr, Eu, Pb с коэффициентами обогащения до 100 и Cu, Zn, Ba – до 1000 единиц. Во фракции PM_{2.5} установлено нарушенное индикаторное отношение Ce/Eu - 25 относительно условного фона (77,3) в неотопительный период. В почвенном покрове выявлены индикаторные элементы Cu, Pb, с коэффициентами концентрации 2,1 и 4,7 соответственно, широко распространенные по площади, при этом суммарный показатель загрязнения составляет 14,7, что соответствует низкому уровню загрязнения.

Достоверность результатов обеспечивается за счет использования современных теоретических и методических подходов в области геоэкологии и геохимии окружающей среды. Ключевую роль играет значительный объем фактических данных, который включает статистически значимое количество образцов, отобранных и подготовленных по единой методике в соответствии с нормативными документами. Эти образцы были проанализированы с помощью высокочувствительных лабораторно-аналитических методов в аккредитованных лабораториях.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы представлены на Региональных и Международных научных конференциях: VII Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон. Радиационное наследие и перспективы развития» (РК, г Курчатов, 2016 г.), XV-я конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра РК (РК, г Курчатов, 2016 г.), VIII Международная конференция «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (РК, г Курчатов, 2018 г.), XVII конференция-конкурс НИОКР молодых ученых и специалистов Национального ядерного центра РК (РК, г Курчатов, 2018 г.), VII. Terrestrial Radionuclides in Environment International Conference on Environmental Protection, in person and online (Hungary, Veszprém, 2020); VI Международная конференция «Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека» (РФ, г.Томск, 2021 г.).

Публикации. Основные положения и научные результаты диссертации опубликованы в 10 научных работах из них 3 статьи в изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science, 1 статья в издании РК и 6 публикации в материалах конференций.

Личный вклад автора заключается в планировании, организации и выполнении всех работ по отбору, подготовке и аналитическому изучению исследуемых компонентов природной среды (твердые частицы аэрозолей воздуха, почва, снег, уголь, зола), пробоподготовке, проведении части лабораторных исследований вышеперечисленных проб в лабораториях Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан,

МИНОЦ «Урановая геология» им. Л.П. Рихванова (НИ ТПУ), статистической обработке и интерпретации полученных результатов. Написание текста и формулировка основных положений выполнялись автором по плану, согласованному с научным руководителем.

Структура и объем диссертации. Диссертация объемом 179 страниц состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 286 наименований, содержит 46 рисунков, 18 таблиц и 4 приложения.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность своему научному руководителю д.г.-м.н., профессору отделения геологии Язикову Егору Григорьевичу за помощь на всех этапах выполнения диссертации. Признательность автор выражает д.б.н. Лукашенко С.Н., PhD Дюсембаевой М.Т., к.б.н. Умарову М.А. за возможность проведения экспериментальных работ и за внешний контроль результатов анализа. Особую благодарность автор выражает Шакенову Е.З., Есильканову Г.М., Мухамедиярову Н.Ж., Ташековой А.Ж., Колбину В.В. за помощь в проведении аналитических работ. Автор благодарен преподавательскому составу отделения геологии ТПУ за содействие в проведении лабораторных исследований в МИНОЦ им. Л.П. Рихванова «Урановая геология». Автор признателен за помощь в отборе проб сотрудникам ИРБЭ НЯЦ РК Дашук А.С., Дерепаско П., Садыкову Р., Супрунову В., Тиняеву С., за оказание технической помощи Серой О.В., Омархановой А., Томилову К., Монаенко В. Н. и Абишевой М. Отдельную благодарность автор выражает родным и близким за поддержку и веру во время проведения исследований и написания диссертационной работы.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы исследований, изложены цель и задачи, сформулированы защищаемые положения, показана научная новизна и практическая значимость выполненной работы.

Первая глава посвящена степени изученности и основным направлениям исследований Семипалатинского испытательного полигона, изученности вопроса радионуклидного состава почвы и твердых частиц аэрозолей воздуха СИП и прилегающих малых населенных пунктов, а также изученности вопроса химического состава твердых частиц аэрозолей воздуха в мире и Республике Казахстан. **Во 2-й главе** описаны геологическая характеристика Семипалатинского испытательного полигона и прилегающих восточных территорий, а также природно-климатические условия СИП и прилегающих восточных территорий. **В 3-й главе** отражена методическая часть исследований, в которой описаны полевые и камеральные этапы работы, включая лабораторно-аналитические методы и методику обработки полученных данных. **В 4-й главе** изложены результаты по радионуклидному и элементному составу почвы по региональному профилю «Восточный след» радиоактивных выпадений. **В 5-й главе** содержатся данные по химическим элементам в составе разных фракций твердых частиц аэрозолей воздуха

внешних границ испытательной площадки «Опытное поле». В 6-й главе приводятся результаты изучения элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха, твердой фазы снегового покрова, угля, золы и почвы территории населенного пункта Долонь. В заключении представлены основные выводы и рекомендации.

ОБОСНОВАНИЕ ЗАЩИЩЕНЫХ ПОЛОЖЕНИЙ

Первое защищаемое положение

Естественная радиоактивность на местах радиоактивного следа в большей степени определяется присутствием в почвенном профиле ^{40}K , ^{232}Th , ^{210}Pb , ^{238}U , что согласуется в целом с результатами других авторов (Królak et al., 2010; Tulashvili et al., 2021; Kayakökü, 2024; Iglovsky et al., 2025) и наглядно представлено в таблице (Таблица 1).

Таблица 1 – Статистические параметры значений удельной активности естественных радионуклидов в почве регионального профиля «Восточного следа» (0-5 см), Бк/кг

Исследовательские участки	X±δ				Min-max			
	^{40}K	^{210}Pb	^{232}Th	^{238}U	^{40}K	^{210}Pb	^{232}Th	^{238}U
Эпицентр взрыва	550	58	22	17	550	58	22	17
Ближняя зона (12-62 км)	580±20	47,5±8,0	22,0±2,3	18,3±0,6	520-610	35-69	17-28	17-20
Средняя зона (82-110 км)	710±41	42,0±5,3	18,6±3,8	13,1±1,3	560-780	28-56	9,0-28	9,7-17
Дальняя зона (120 и более км)	645±67	58,0±8,1	28,0±7,0	19,3±5,0	530-790	44-81	18-49	12-34
ГН UNSCEAR*	420	-	45	33	-	-	-	-

Примечание: *- UNSCEAR, 2000. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. United Nations, New York, NY, USA, 2000

По профилю радиоактивных выпадений «Восточного следа» в образцах почвы концентрация естественных радионуклидов распределена равномерно. Из этого следует, что состав почвы абсолютно идентичен по содержанию указанных радионуклидов на протяжении исследуемого профиля. Согласно данным, верхний слой почвы (до 5 см) включает в себя 95–98 % техногенной составляющей и представляет собой ключевой элемент депонирующей природной среды, который сохраняет накопительный эффект многолетнего техногенного воздействия. Результаты данного исследования частично подтверждают тезис, изложенный в работах зарубежных авторов (Abusini et al., 2008; Perevoshchikov et al., 2022; Yang Y.-X., 2005). Также, как отмечено в работах и казахстанских авторов (Умаров, 2001; Паницкий и др., 2013; Лукашенко и др., 2020), максимальные концентрации радионуклидов фиксируются на глубине до 10 см. Однако для большинства светло-каштановых почв, где проходит радиоактивный след, наибольшие значения удельной активности радионуклидов наблюдаются лишь до 5 см.

Радионуклидный состав почв по профилю «Восточного следа» определяется в основном содержанием ^{137}Cs и $^{239+240}\text{Pu}$ (таблица 2). По выявленным концентрациям данных радионуклидов наблюдается неоднородное распределение по всему 140 км профилю от испытательной площадки «Опытное поле».

Таблица 2 – Статистические параметры значений удельной активности техногенных радионуклидов в почве регионального профиля «Восточный след» (0-5 см), Бк/кг

Исследовательские участки	X±δ				Min-max			
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu	²⁴¹ Am
Эпицентр взрыва	22	3,1	110	9,5	22	3,1	110	9,5
Ближняя зона (12-62 км)	12,0±4,0	1,5	20,0±9,0	3,3	3,6-21	<0,1-1,5	0,9-53	<0,1-3,3
Средняя зона (82-110 км)	6,6±1,8	1,1±0,5	9,2±4,0	<0,1	1,9-12	<0,1-3,2	1,5-25	<0,1
Дальняя зона (120 и более км)	19,0±8,0	3,1±1,0	24,0±12,0	2,6	3,4-35	<0,1-5,7	1,4-49	2,6
Фон глобальных выпадений (Василенко, И.Я., 2001 и др.)	18	11	4	0,8	-	-	-	-

По представленным данным распределение содержания ⁹⁰Sr в исследуемых образцах почвы основного радиоактивного следа имеет эпизодичный характер в сравнении с распределением техногенного радионуклида ¹³⁷Cs (таблица 2). Такое распределение объясняется легким механическим составом почвы, влиянием человеческой деятельности и высокой подвижностью и растворимостью самого радионуклида ⁹⁰Sr. Надо принять во внимание эти факторы для понимания поведения ⁹⁰Sr и его воздействия на экосистемы, которые были изучены Паницким в соавторстве другими авторами (2013) на «Южном» и «Юго – Восточном» следах радиоактивных выпадений. В некоторых исследованиях обсуждается влияние органических компонентов почвы на формирование физико-химических связей радионуклидов. В частности, ⁹⁰Sr в основном взаимодействует с мобильными частями гумуса, такими как фульвокислоты и неспецифические соединения. Напротив, ¹³⁷Cs связывается с гуминовыми кислотами, которые имеют гораздо более низкую подвижность в почвенной среде (Вирченко и др., 1993; Агапкина и др., 2023), что также объясняет поведение данных радионуклидов. На сегодняшний день установлены следующие ⁹⁰Sr/¹³⁷Cs отношения: для эпицентра взрыва - 0,14; для ближней зоны – 0,13; для средней зоны – 0,17; для дальней зоны – 0,16. При этом следует отметить, что в ранее проведенных исследованиях в 2012-2014 гг. ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr изотопное отношение для территории населенного пункта Долонь составило значение, равное 0,4 (Лукашенко и др., 2015).

Распределение содержания ²³⁹⁺²⁴⁰Pu имеет нестабильный характер, в связи с чем обследованный профиль следа можно разделить на условные зоны. В начале на отрезке от 0 до 22 км и на 130–140 км профиля обнаружены значения удельных активностей, равные 110, 53, 43 и 49 Бк/кг, соответственно с превышением в десятки раз уровня фона глобальных выпадений, равный 4 Бк/кг. На отрезках от 42 до 62 км, а также на участке 98 км, превышение составило до 10 раз (от 3 до 6). Практически на протяжении всей траектории радиоактивного следа в исследуемых образцах почвы не был обнаружен ²⁴¹Am, за исключением отдельных точек с превышением фона глобальных выпадений от 3 до 12 раз. А индикаторные ²³⁹⁺²⁴⁰Pu/²⁴¹Am отношения составляют для эпицентральной зоны – 11,6 (условно «0» км); ближней зоны – 6,1 (12-62 км); дальней зоны – 9,2 (120-140 км).

В целом, значение $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ отношения в почвах по региональному профилю не превышает значения ранее полученных данных (28 единиц – на территории н.п. Долонь), подтверждая стабильность изотопного состава в данной зоне. Это свидетельствует об отсутствии значительных изменений в перераспределении $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am за исследуемый период, обусловленное в первую очередь их большими периодами полураспада более 30 тысяч и 400 лет соответственно. Также такого рода пространственное распределение радионуклидов связано с неравномерным выпадением радиоактивных осадков, обусловленным неблагоприятными метеорологическими условиями в момент испытания. Это привело к формированию локальных участков радиоактивного загрязнения на отметках от 0 до 20 км, от 35 до 50 км, а также на расстоянии 140 км и далее по профилю следа.

По результатам элементного анализа состава образцов почв, отобранных по профилю «Восточного следа», наблюдается неоднородное распределение содержания химических элементов на протяжении всего профиля (Рисунок 1, а–в).

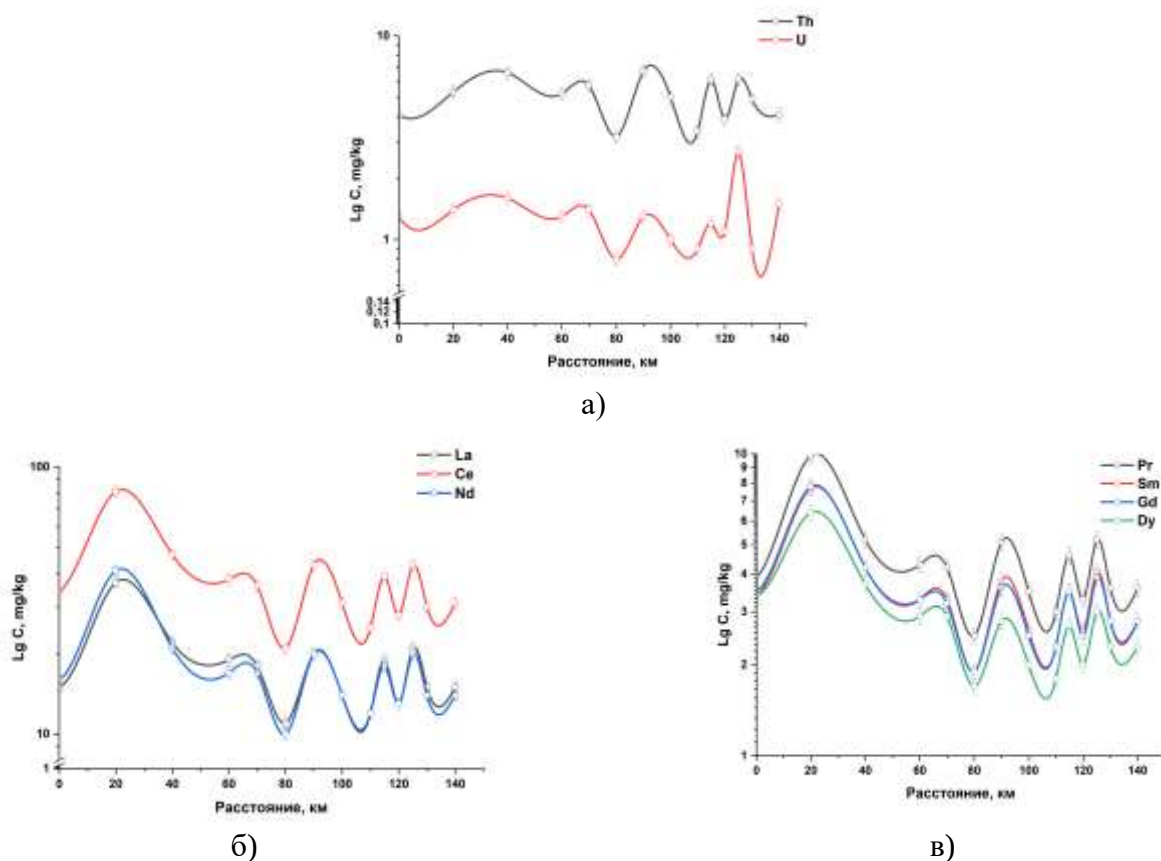


Рисунок 1. Распределение химических элементов в почве регионального профиля «Восточного следа» (0-5 см)

Содержание Th (валовое содержание) в исследуемых образцах почв по профилю «Восточного следа» изменяется от 3,2 до 6,7 мг/кг, тогда как концентрация U (валовое содержание) в этих же почвах варьирует от 0,8 до 2,7 мг/кг. При этом в эпицентре взрыва (Опытное поле) среднее содержание Th составляет 4,1 мг/кг, U –

1,3 мг/кг. Как видно из представленных данных разница между минимальным содержанием Th и U отличается в 4 раза, между максимальными - в 2,5 раза соответственно, что подтверждает миграционную активность U, вследствие чего можно утверждать, что U не накапливается в поверхностном слое почвы (0-5 см). Отношение валовых содержаний тория к урану (Th/U), этот показатель как свидетельствуют другие исследования (Рихванов, 2002; C.J. Allegre et.al., 2008) является важным индикатором и находится в узком интервале величин 2,5-5. Установлено, что на территории испытательной площадки «Опытное поле» Th/U отношение составляет 3,2, в ближней зоне – 4,0, средней – 4,7 и дальней – 3,1, что практически соответствует кларковому значению для верхней части континентальной коры, равному 3,64 (Григорьев, 2009).

Для редкоземельных элементов выявлена некоторая особенность распределения элементов в почвах по профилю, которая проявляется максимальными значениями на 22 км от внешних границ площадки «Опытное поле» в восточном направлении. Далее по профилю содержание их понижается до отметки 82 км. От данной отметки содержание редкоземельных элементов приобретает более динамичный скачкообразный характер. При этом следует отметить, что выявленные значения содержания редкоземельных элементов по профилю «Восточный след» значительно превышают их значения, выявленные в составе почвы условно фоновой территории (г. Курчатов). Так, для эпицентра по легким лантаноидам (La, Ce, Pr, Nd, Sm) величина изменяется от 5 до 17 раз, по тяжелым (Eu, Gd, Dy, Tm, Yb, Lu) от 2 до 12 раз; для ближней зоны по легким лантаноидам от 8 до 24 раз, по тяжелым – от 2 до 16 раз; для средней по легким лантаноидам от 6 до 15 раз, по тяжелым – от 1,3 до 9 раз; для дальней по легким лантаноидам от 6 до 16 раз, по тяжелым – от 1,5 до 10 раз. Индикаторными отношениями элементов для почвы профиля «Восточный след» являются отношения $La+Ce/Yb+Lu$, которые отражают специфические геохимические особенности распределения лантаноидов. Эти отношения иллюстрируются на рисунке 2. Для образцов с площадки «Опытное поле» величина отношения $La+Ce/Yb+Lu$ составляет 25,8. В случае ближней зоны наблюдается увеличение и достигает 33,8. Для образцов средней зоны - 47,0 и дальней зоны 35,5.

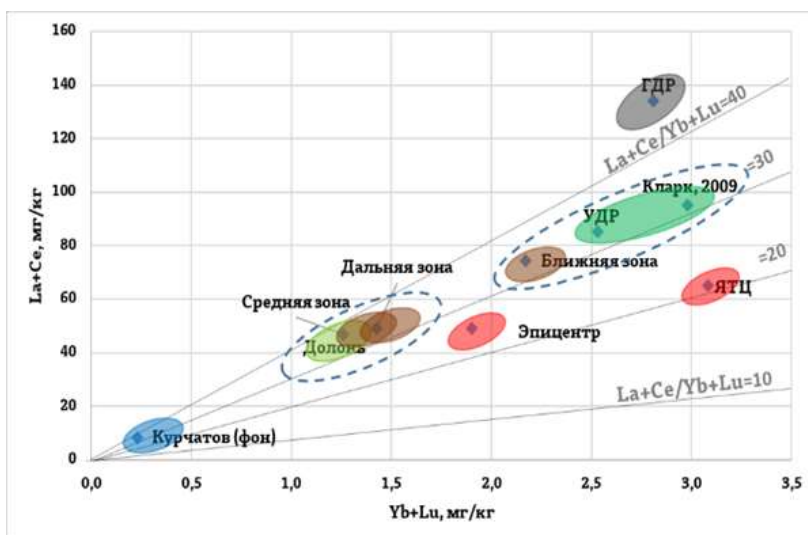


Рисунок 2. Геохимическая типизация почвы территории зоны воздействия «Восточного следа», в сравнении с урбанизированными территориями разнопрофильного производства юга Западной Сибири и г.Усть-Каменогорск

Примечание: ЯТЦ - Предприятия ядерно-топливного цикла; УДР - угледобывающий район, ГДР - горнодобывающий район (по данным Язикова Е.Г., 2006); Кларк - среднее содержание в верхней континентальной коре (Григорьев Н.А., 2009);

Таким образом, особенностью почв испытательной площадки «Опытное поле» являются повышенные концентрации лантана, которые значительно понижают величину $La+Ce/Yb+Lu$ отношения (25,8 единиц), что ниже значения отношений кларка в верхней части континентальной коры (31,9) и формируют поле (выделенное в красный цвет) на диаграмме.

При нормировании содержания элементов в почве территории зоны воздействия относительно континентальной земной коры и хондрита (Taylor, 1995) отмечается природное происхождение группы редкоземельных элементов (Рисунок 3)

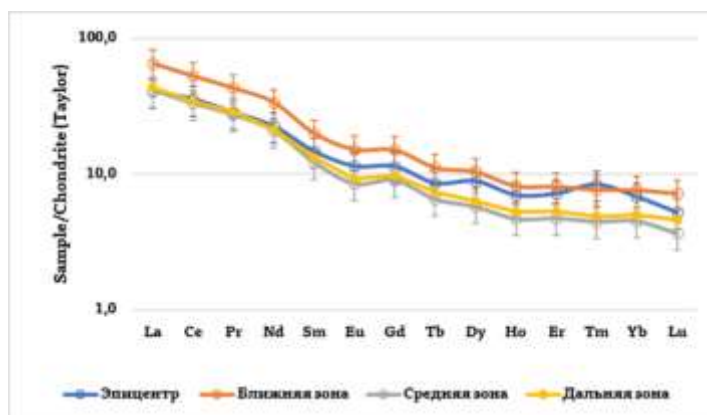


Рисунок 3. Нормирование содержания элементов в почве территории зоны воздействия «Восточного следа» к Chondrite

В образцах почвы с внешних границ площадки «Опытное поле» обнаружены сравнительно невысокие концентрации Sr, U и Pb, значения которых на уровне одного их кларка в почве (Григорьев, 2009).

Сделанные выводы обосновывают **1-е защищаемое положение.**

Второе защищаемое положение

Исследуемая территория расположена в зоне резко-континентального климата с холодной зимой и жарким летом. В этой местности преобладает ровный рельеф, коренные породы которых подвержены воздействию ветряной и водной эрозии.

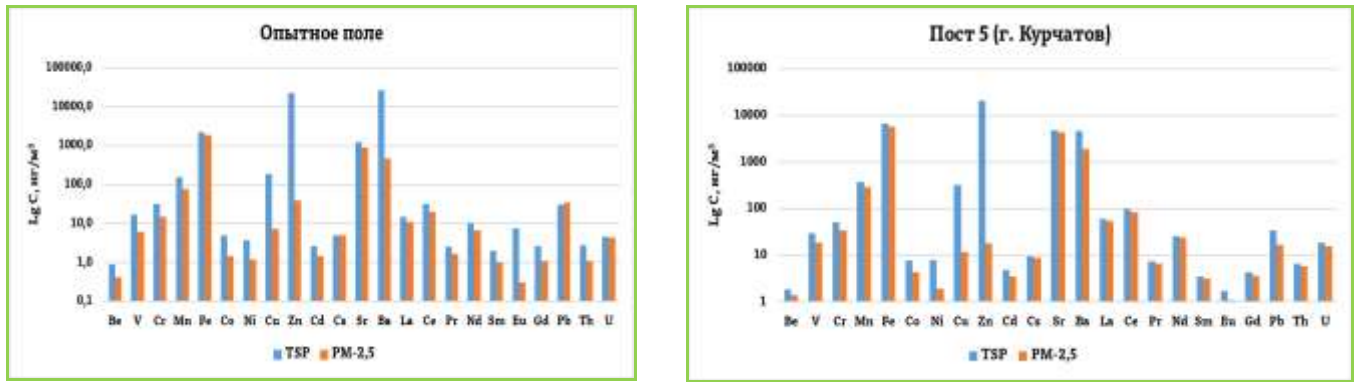
Величины запыленности атмосферного воздуха исследуемых участков сравнены с критериями оценки состояния атмосферного воздуха – ПДК взвешенных частиц – TSP и PM_{2.5}, выраженных в мг/м³. Выявлено, что величина среднесуточной пылевой нагрузки общих взвешенных частиц составляет 0,02 мг/м³, что ниже величины ПДК 0,15 мг/м³, а по PM_{2.5} – 0,01 мг/м³ (ПДК – 0,035 мг/м³). Преимущественное направление ветра в период отбора проб вблизи границ площадки «Опытное поле» – северное-северо-восточное и юго-западное.

По результатам проведенного гамма-спектрометрического анализа установлено (Техническая справка о результатах работ по этапу 04.01.01, 2021), что объемная активность радионуклидов в составе внешних границ площадки «Опытное поле» составила: для ⁴⁰K – от $<3,9 \times 10^{-6}$ до $1,3 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, ²³²Th – $<1,5 \cdot 10^{-6}$ Бк/м³, ²²⁶Ra – $<8,9 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, для ¹³⁷Cs – $<5,3 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³, ²⁴¹Am – $<3,3 \cdot 10^{-7}$ Бк/м³.

По полученным результатам определено, что состав крупнодисперсных твердых частиц аэрозолей воздуха испытательной площадки «Опытное поле» и г. Курчатова (пост 5) более обогащены содержанием исследуемых химических элементов, чем их тонкодисперсная фракция. Так, концентрация изучаемых химических элементов в воздушных аэрозолях TSP на площадке «Опытное поле» превышает значения концентрации в воздушных аэрозолях PM_{2.5} от 1,5 до 100 раз (рисунок 4 а), при этом исключение составили Fe, Cs, Sr, La, Pb и U, т.е. исследуемые фракции одинаково обогащены перечисленными элементами.

Также установлено, что концентрации большинства исследуемых элементов в составе общих взвешенных частиц (TSP) г. Курчатова (пост 5) в 1,5–4 раза выше за исключением Ba и Eu, чем в составе TSP «Опытное поле». По посту 5 (г. Курчатова) превышение содержания в составе TSP наблюдается для меньшего количества элементов, а именно V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ba, Eu, Pb. Превышение составляет от 1,5 до 1000 раз (рисунок 4 б).

Известно, что более мелкие частицы в большинстве своем «странствуют» и источники их формирования могут быть расположены за 100 км от места отбора проб (Amann, 2006). Однако в данном случае относительно высокие концентрации перечисленных групп элементов обнаружены в крупных частицах, в связи с чем можно предположить, что источником их формирования является почвенный покров исследуемой местности.

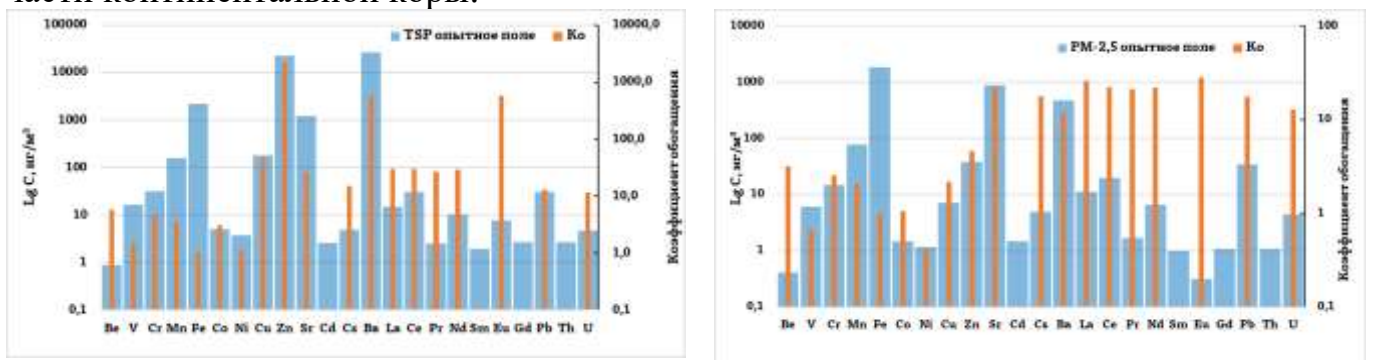


а)

б)

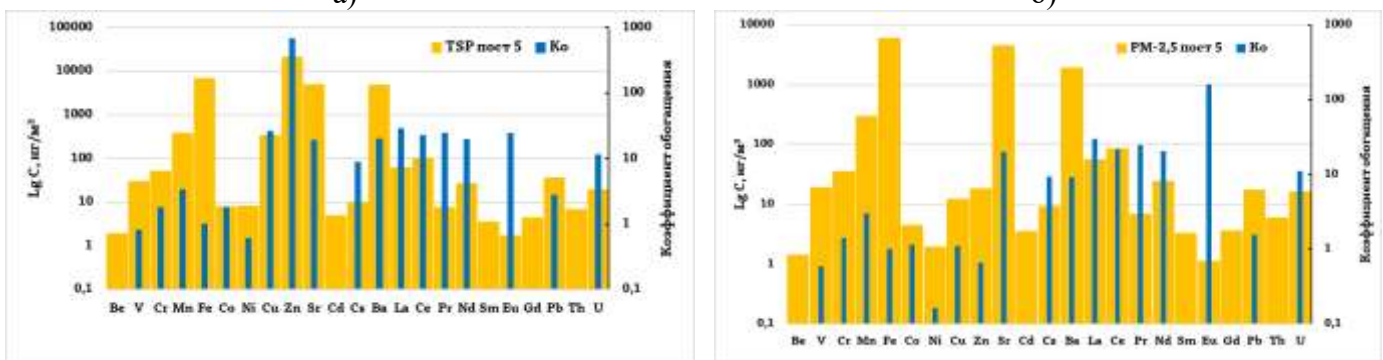
Рисунок 4. Среднее содержание элементов в составе TSP и PM2.5 площадки «Опытное поле» (а) и Поста 5 (г. Курчатов, условно-фоновой территории) (б)

По рассчитанному коэффициенту обогащения (EF) (Soto-Jiménez, 2003; Das 2015) твердых частиц аэрозолей воздуха испытательной площадки «Опытное поле» и условно фоновой поста (г. Курчатов) отдельными элементами (C_i) по отношению к их почвенным содержаниям с использованием элемента-эталоны (Рисунок 5 а-г) Fe установлены степени обогащения TSP и PM2.5 (Tahri et al., 2022; Gao et al., 1992; Das et al., 2015; Liang et al., 2018; Lin et al., 2020). В настоящем исследовании в качестве эталонного элемента был выбран Fe, который является одним из наиболее широко распространенных и отличается относительно стабильной динамикой распределения в почве по профилю «Восточный след» и не превышает его содержание в верхней части континентальной коры.



а)

б)



в)

г)

Рисунок 5. Коэффициенты обогащения фракций твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP, PM2.5) испытательной площадки «Опытное поле» (а, б) и условно фоновой поста г. Курчатов (в, г)

Изучаемые фракции твердых частиц аэрозолей воздуха испытательной площадки «Опытное поле» аномально обогащены Zn (значение $EF > 1000$ для TSP), Ba и Eu ($EF > 100$ для TSP), умеренно обогащены Cu ($EF > 10$ для TSP), для обеих фракции характерно умеренное обогащение рядом представленных элементов - Sr, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Pb, U (значение $EF > 10$) и дополнительно Ba для PM_{2.5} (значение $EF > 10$), за ними следуют V, Cr, Mn, Co и Ni со значениями EF около 5 (необогаченный).

На посту 5, условно фоновой территории г. Курчатова (Рисунок 5 в, г), исследуемые фракции аэрозолей воздуха в свою очередь аномально обогащены Zn (значение $EF > 100$ для TSP) и Eu ($EF = 100$ для PM_{2.5}), для обеих фракции умеренно обогащены - Sr, Cs, La, Ce, Pr, Nd, U (значение $EF > 10$), тогда как для TSP есть еще умеренное обогащение содержанием Cu с $EF > 10$.

В местах отбора проб испытательной площадки «Опытное поле» наблюдается предельное обогащение TSP содержанием Ba и Eu со значениями EF более 500, а также Zn более 2000 единиц, что указывает на то, что эти элементы происходят из смеси антропогенных и природных источников, включая выветрившиеся почвы и горные породы. Картина обогащения, где редкоземельные элементы накапливаются одинаково в обеих исследуемых фракциях, согласуется с результатами и других исследований (Kulkarni et al., 2006; Wang et al., 2014).

Также следует отметить, что значения EF редкоземельных элементов выше в мелких частицах по сравнению с крупными с превышением от 1,2 до 16 раз, это можно объяснить тем, что антропогенные выбросы, вероятно, вносят значительный вклад в образование мелких частиц, содержащих РЗЭ, в то время как природные РЗЭ в основном находятся в более крупных.

Установлено, что накопление содержания некоторых редкоземельных элементов в исследуемых фракциях твердых частиц аэрозолей воздуха происходит одинаково, что свидетельствует об их едином источнике поступления. Исходя из представленных данных и особенностью накопления РЗЭ в исследуемых фракциях твердых частиц аэрозолей воздуха рассчитаны их индикаторные отношения. Так для состава TSP испытательной площадки «Опытное поле» установлено нарушенное индикаторное отношение: Ce/Eu (4,1) при их кларке 72 единиц, а также при значении 58,8 единиц относительно условно фонового поста г. Курчатова (Рисунок 6).

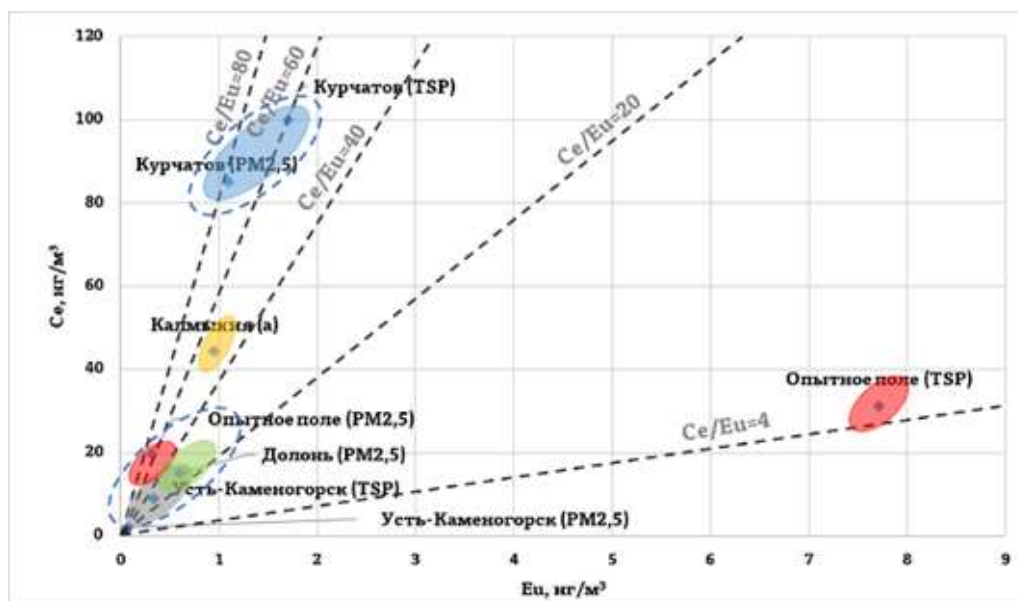


Рисунок 6. Ce/Eu отношения в составе аэрозолей (PM2.5, TSP) испытательной площадки «Опытное поле»

При нормировании содержания редкоземельных элементов в составе фракций аэрозолей воздуха на испытательной площадке «Опытное поле» относительно хондрита (Taylor, 1995) выявлено превышение содержания Eu (Рисунок 7).

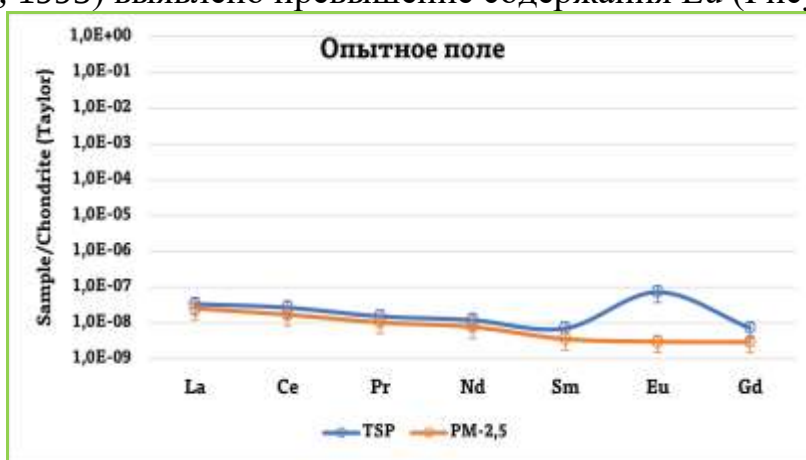


Рисунок 7. Нормирование содержания элементов в составе фракций аэрозолей воздуха испытательной площадки «Опытное поле» к Chondrite

Этот факт может указывать на наличие дополнительного источника поступления данного элемента, вероятно связанного с техногенными процессами, происходящими на площадке. Повышенное содержание Eu может быть обусловлено выбросами в атмосферу при проведении испытаний, разрушением горных пород или использованием специфических материалов, содержащих этот элемент. Дальнейший анализ распределения редкоземельных элементов и их соотношений может помочь более точно определить источник загрязнения.

Сделанные выводы обосновывают **2-е защищаемое положение.**

Третье защищаемое положение

В твердых частицах аэрозолей воздуха населенного пункта Долонь по значениям концентрации можно выделить группы элементов, характерных для определенных сезонов. Так, в летний период в составе твердых частиц аэрозолей воздуха PM_{2.5} были обнаружены относительно высокие концентрации Cr, Mn, Th и некоторых РЗЭ – La, Pr, Nd, Sm, относительно их содержания в составе аэрозолей в отопительный сезон (Рисунок 8).

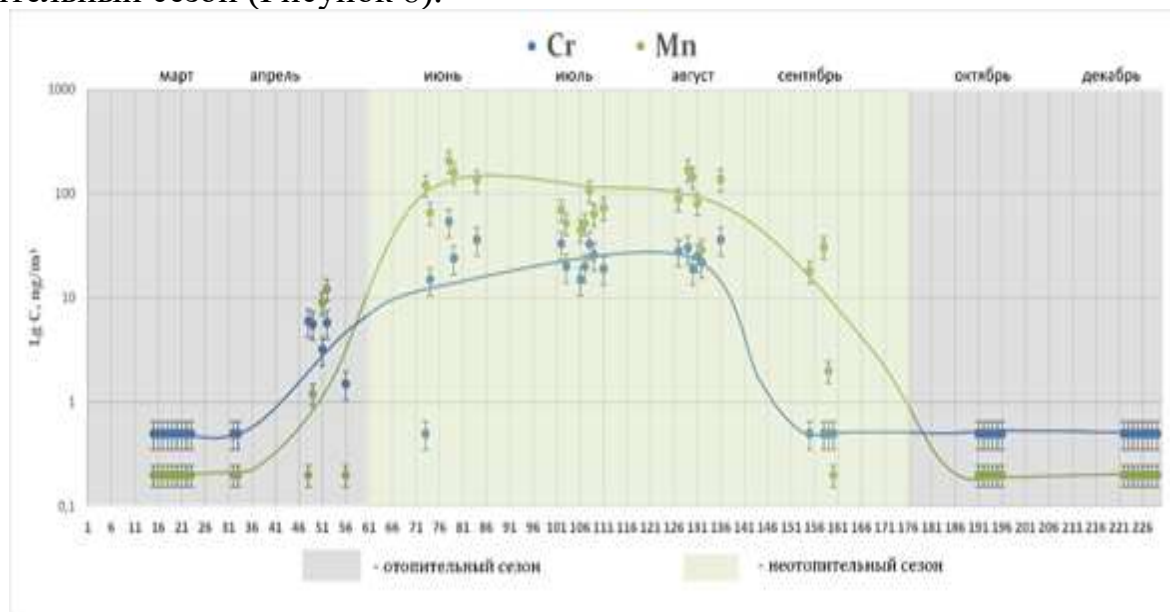


Рисунок 8. Динамика содержания элементов (элементы неотопительного сезона) в составе PM_{2.5}

В зимний период отмечена относительно высокая концентрация Be, Co, Ge, Cd, Bi в составе PM_{2.5} в сравнении с их содержанием в летний период (Рисунок 9).

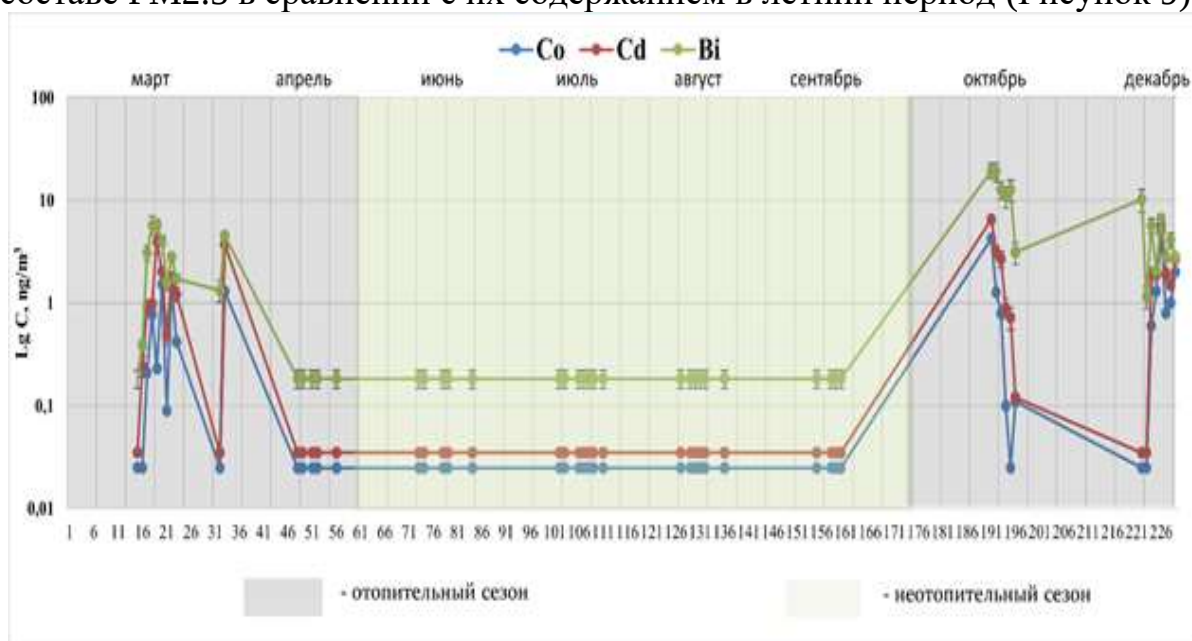


Рисунок 9. Динамика содержания элементов (элементы отопительного сезона) в составе PM_{2.5}

Также установлено относительно стабильное распределение содержания Cu за весь исследуемый период. Стабильность динамики распределения содержания Cu независимо от периодов свидетельствует о его постоянном источнике поступления в атмосферный воздух исследуемой территории. С помощью растрового сканирующего электронного микроскопа также установлены частицы Cu в твердых частицах аэрозолей воздуха (Рисунок 10 а, б).

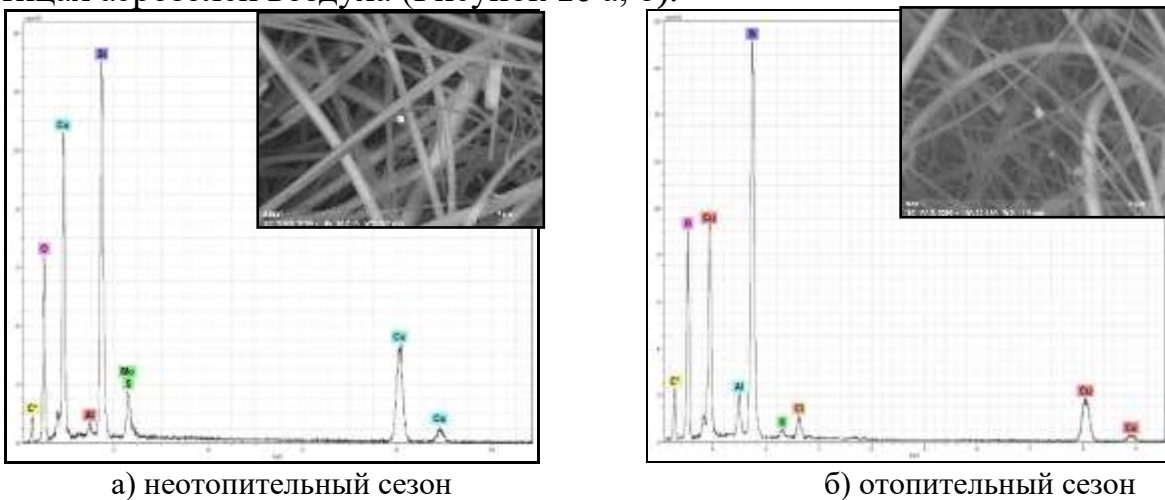


Рисунок 10. Частицы Cu в образцах PM2.5

В неотопительный сезон установлено значительное обогащение фракции твердых частиц аэрозолей в населенном пункте Долонь элементами Ba (13300 нг/м^3) и Zn (6100 нг/м^3), с коэффициентами обогащения 820 и 690 соответственно, что свидетельствует о влиянии антропогенных источников, преимущественно техногенного происхождения. Также зафиксировано обогащение Cu, Eu и As, коэффициенты обогащения которых составляют 100, 63 и 57 единиц соответственно. Максимальные коэффициенты обогащения в зимний период получены для Zn и Ba, составившие 450 и 290 единиц соответственно, что указывает на их значительное поступление в атмосферу при сгорании угольного топлива. Кроме того, зафиксировано обогащение Bi с коэффициентом 310 единиц, что также может свидетельствовать о влиянии источников техногенного характера.

При этом для состава PM2.5 населенного пункта Долонь установлено нарушенное индикаторное отношение Ce/Eu (25) при их кларке 72 единиц, а также при значении 77,3 единиц относительно условно фонового поста г. Курчатов в неотопительный период (Рисунок 11).



Рисунок 11. Нормирование содержания элементов в составе фракций аэрозолей воздуха PM2.5 н.п. Долонь к Chondrite

Это свидетельствует о нарушении природного распределения редкоземельных элементов, что, по-видимому, связано с воздействием техногенных факторов. Наиболее вероятными механизмами выступают переотложение загрязненных почвенных частиц и поступление аэрозольного материала из внешних источников, характеризующихся измененной (аномальной) РЗЭ-сигнатурой. Таким образом, соотношение Ce/Eu и аналогичные индикаторные параметры представляют собой информативный инструмент для диагностики степени техногенной переработки и трансформации атмосферных частиц.

Среднее содержание химических элементов в почвах населенного пункта Долонь, не превышает значения, характерные для проб, отобранных с условно фонового участка, и находится в пределах одного порядка величин. Однако зафиксированы превышения по содержанию элементов Cu, Zn, Sr, Nb, Cs, Ba и Pb, составляющие от 1,5 до 4,7 раз относительно фоновых уровней. При этом концентрации указанных элементов не превышают их средние значения в почвах малых населенных пунктов, что подтверждает гипотезу, выдвинутую В.А. Алексеенко (Алексеенко и др., 2013). В сравнении со средним содержанием в почвах малых населенных пунктов, в исследуемых образцах почвы с. Долонь обнаружены относительно высокие концентрации Mg, Al, Fe, Cr, Zn, Sr, Cs, Th и U, а также РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm). Следует отметить, что более чем для половины исследуемых химических элементов не установлены средние содержания в почвах Земли, селитебных и сельскохозяйственных и техногенных ландшафтов.

При расчетах кларков концентраций элементов в качестве фона использовались средние содержания элементов в верхней части континентальной коры по данным Н.А. Григорьева (Григорьев, 2009). Согласно полученным значениям кларков концентраций, превышения по сравнению с установленными средними значениями для верхней континентальной коры не выявлены, за исключением Pb, содержание которого приближается к уровню кларка.

Для оценки уровня техногенной нагрузки на почвы дополнительно был рассчитан суммарный показатель загрязнения (Zc), который представляет собой

интегральную характеристику степени загрязненности почв токсичными элементами. По результатам расчетов установлено, что исследуемые почвы населенного пункта Долонь в целом характеризуются низким уровнем загрязнения: значение Z_c составляет 14,7, что соответствует категории «низкое загрязнение» (при $Z_c < 16$).

Сделанные выводы обосновывают **3-е защищаемое положение.**

Основные выводы и рекомендации

На территории зоны воздействия «Восточного следа» СИП по региональному профилю выявлены в образцах почв высокие значения удельной активности техногенных радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am относительно фона глобальных выпадений, которые равны для эпицентра ($^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am) 110 и 9,5 соответственно, для ближней зоны – 20,0 и 3,3, для средней – 9,2 и меньше $< 0,1$, для дальней – 2,4 и 2,6 (Бк/кг).

По величине индикаторных отношений радионуклидов ($^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$), определены зоны воздействия радиоактивного следа: эпицентр, ближняя, средняя и дальняя зоны. На этих зонах установлены нарушенные $^{239+240}\text{Pu}/^{241}\text{Am}$ индикаторные отношения, которые в эпицентре взрыва равны – 11,6 единицам, в ближней зоне – 6,1, в дальней – 9,2, которые значительно превышают фоновые значения, обусловленные глобальными выпадениями (5,0). Также определены значения индикаторных отношений $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$, которые равны для эпицентра – 0,14, ближней зоны – 0,12, средней – 0,17 и дальней – 0,16, при фоне 0,6.

Неравномерное распределение радиоактивных осадков указывает на мозаичный характер загрязнения, обусловленный как первичным выпадением радиоактивных веществ, так и их последующей миграцией под воздействием природных факторов. Долговременная стабильность этих загрязненных участков подчеркивает необходимость продолжения исследований и мониторинга для оценки их влияния на окружающую среду и потенциальных рисков для экосистем и здоровья населения.

Для разных участков территории зоны воздействия «Восточный след» наблюдается также особенность пространственного распределения содержания редкоземельных элементов. Отмечены высокие содержания группы РЗЭ в составе почвы, отобранной непосредственно с территории СИП (ближняя зона).

Во фракциях твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP, PM2.5) испытательной площадки «Опытное поле» установлены различные степени обогащения химическими элементами. Так, для крупнодисперсной фракции TSP характерен аномально высокий уровень обогащения Zn, Ba и Eu с $EF > 100$ и умеренный уровень обогащения Cu (> 10). Обе фракции умеренно обогащены элементами - Sr, Cs, La, Ce, Pr, Nd, Pb, U и PM2.5 дополнительно Ba.

В местах отбора проб испытательной площадки «Опытное поле» наблюдается предельное обогащение TSP содержанием Ba и Eu со значениями EF более 500, а также Zn более 2000 единиц, что указывает на антропогенные и природные

источники. На условно фоновой территории г. Курчатова исследуемые фракции аэрозолей воздуха в свою очередь аномально обогащены Zn (значение EF >100 для TSP) и Eu (EF =100 для PM_{2.5}), для обеих фракций умеренно обогащены - Sr, Cs, La, Ce, Pr, Nd, U (значение EF >10), тогда как для TSP есть еще умеренное обогащение содержанием Cu с EF>10.

Полученные значения индикаторного отношения Ce/Eu (4) в аэрозолях TSP испытательной площадки «Опытное поле» свидетельствуют о существенном техногенном нарушении природного распределения редкоземельных элементов.

Химический состав атмосферных аэрозолей в районе населенного пункта Долонь имеет выраженную сезонную специфику, отражающую влияние как природных, так и техногенных факторов. Сезонная изменчивость содержания химических элементов в атмосфере населенного пункта Долонь зависит от 2-х факторов: почвенная эрозия и сжигание твердого топлива, т.е. максимальный сезонный вклад таких источников, как выбросы в атмосферу в процессе сжигания угля, наблюдался зимой, тогда как вклад почвенной пыли, был выше летом. Также анализ полученных данных показал, что в пробах воздушных аэрозолей превышения предельно допустимых концентраций среднесуточного содержания химических элементов не обнаружено.

Основным источником поступления РЗЭ является процесс сжигания твердого топлива, прежде всего угля Каражыринского месторождения, зольные остатки которого характеризуются повышенным содержанием микроэлементов и редкоземельных соединений. В то же время, по результатам анализа атмосферных аэрозолей фракции PM_{2.5}, проведенного в отопительный период, РЗЭ в составе мелкодисперсных частиц обнаружены не были, что, вероятно, связано с их удержанием в более тяжелых фракциях золы, оседающих вблизи источников выбросов. Это подтверждает гипотезу о локальном характере загрязнения и преимущественном поступлении РЗЭ в почву через твердофазные остатки горения, а не воздушную транспортировку.

При нормировании содержания редкоземельных элементов в составе мелкой фракций аэрозолей воздуха Долонь относительно хондрита (Taylor, 1995) выявлено нарушенное отношение по Eu, что также предполагает дополнительный его источник поступления, тогда как, нормирование элементного состава почв к хондриту позволило установить их преимущественно природное происхождение.

Химические отношения микроэлементов соответствуют фоновым значениям, характерным для естественных геохимических условий, без признаков значительного техногенного влияния. Это подтверждает, что формирование почвенного профиля происходило в условиях, близких к естественным, с доминированием литогенного фактора. Расчеты суммарного показателя загрязнения (Z_c) показали, что почвы н.п. Долонь имеют низкую степень загрязнения (Z_c = 14,7). Обобщая результаты проведенных исследований, можно заключить, что почвы населенного пункта Долонь в целом формировались в условиях, близких к

естественным, и характеризуются природным минеральным и элементным составом, не превышающим допустимых нормативов. Средние содержания большинства химических элементов соответствуют фоновым значениям. Полученные данные подчеркивают необходимость учета минерального и элементного состава золы как одного из значимых факторов, влияющих на экологическое состояние почвенной среды в условиях использования угольного топлива.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и (или) Web of Science, и из перечня ВАК Минобрнауки России

1. **Темиржанова А.Е.**, Дюсембаева М.Т., Лукашенко С.Н., Язиков Е.Г., Шакенов Е.З., Элементный состав твердой фазы снегового покрова малых населенных пунктов (на примере села Долонь Восточно-Казахстанской области, Республика Казахстан) - Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020, Т.331, №12, с.41-50. DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/12/2937>.
2. **Темиржанова А.Е.**, Язиков Е.Г., Дюсембаева М.Т., Шакенов Е.З., Мухамедияров Н.Ж., Ташеков А.Ж., Есильканов Г.М., Колбин В.В., Умаров М.А. - Сезонная динамика содержания химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха малых населенных пунктов, расположенных в зоне влияния «Восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона. - Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов – 2021. – Т. 332. – № 12. – с.189-199. DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3346>
3. **Темиржанова А.Е.**, Язиков Е.Г., Мухамедияров Н.Ж., Сальменбаев С.Е., Умаров М.А., Есильканов Г.М., Ташекова А.Ж. - Оценка содержания химических элементов в компонентах природной среды «Восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона. - Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов -2022. – Т. 333. - № 9. – с.113-127. DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3741>

Другие публикации

4. Koygeldinova M.T., Lukashenko SN, Kirillova T.G., Mukhamediyarov N.J., **Temirzhanova A.E.**, Tashkova A.J. - Chemical composition of atmospheric aerosols of Kalachi village. - Bulletin of NNC RK. - №4 (72). - 2017. - С. 9-12.
5. **Темиржанова А.Е.**, Дюсембаева М.Т., Каширский В.В. - Выбор оптимального способа пробоподготовки твердых частиц аэрозолей воздуха для определения их элементного состава методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой -Вестник НЯЦ РК. - №4 (76). – 2018. – С. 54-59.
6. **A.Ye. Temirzhanova**, M.T. Dyuisembayeva, Ye.G. Yazikov, Ye.Z. Shakenov. - Concentrations of Rare-Earth Elements Thorium and other chemical elements in Solid Air Aerosols Particles of settlements (on the example of village Dolon). – International Conference on Environmental Protection «VII. Terrestrial Radioisotopes in Environment». - in person and online, 10-13 August 2020. - Veszprém, Hungary
7. **Темиржанова А.Е.**, Язиков Е.Г., Дюсембаева М.Т., Шакенов Е.З., Есильканов Г.М., Мухамедияров Н.Ж., Ташекова А.Ж., Колбин В.В. - Сезонная динамика тяжелых металлов и естественных радионуклидов в аэрозолях воздуха (PM10, PM2.5) малых населенных пунктов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека : IV Междунар. конф., 20-24 сентября 2021 г. - Томск, РФ.