

УДК 539.16:546:551.510.7:502(574.41)

## ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В КОМПОНЕНТАХ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ «ВОСТОЧНОГО» СЛЕДА РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Темиржанова Арай Ермаковна<sup>1</sup>,  
temirzhanova.aray@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич<sup>2</sup>,  
yazikoveg@tpu.ru

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич<sup>1</sup>,  
mukhamediayarov@nnc.kz

Сальменбаев Саян Елеусизович<sup>1</sup>,  
salmenbayev@nnc.kz

Умаров Мурат Алпыспаевич<sup>1</sup>,  
Umarov@nnc.kz

Есильканов Гани Мухтарович<sup>1</sup>,  
yessilkanov@nnc.kz

Ташекова Ажар Жумановна<sup>1</sup>,  
Esenzholova@nnc.kz

<sup>1</sup> Национальный ядерный центр Республики Казахстан,  
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 2.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность** данной работы обусловлена тем, что в зоне воздействия «Восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона не велись работы по оценке содержания химических элементов в компонентах природной среды, включая тяжелые металлы. Параллельное обследование состава твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы испытательной площадки «Опытное поле» Семипалатинского испытательного полигона, где проводились наземные и воздушные ядерные испытания, дает наиболее полную картину о возможных источниках поступления химических элементов в компоненты природной среды по «Восточному» следу, а также пути миграции некоторых элементов и радионуклидов в составе воздушных аэрозолей. Обследование территории северо-восточной части полигона, включая населенные пункты по следу прохождения радиоактивных выпадений, представляет особый интерес для безопасного проживания населения, в приоритете которого сельскохозяйственная деятельность.

**Целью** представленной работы является оценка уровней накопления химических элементов в компонентах природной среды в зоне воздействия «Восточного» следа Семипалатинского испытательного полигона.

**Объекты:** почва, твердые частицы аэрозолей воздуха.

**Методы:** анализ проб методами альфа-, бета- и гамма-спектрометрии, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой, радиохимии и сканирующей электронной микроскопии; статистическая обработка результатов анализа основных исследуемых компонентов природной среды; оценка динамики пространственного распределения содержания радионуклидов и химических элементов в пробах почвы и твердых частиц аэрозолей воздуха исследуемого участка.

**Результаты.** Изучен химический состав (радионуклидный и элементный) почвенного покрова по профилю «Восточного» следа, а также твердых частиц аэрозолей воздуха размером 2,5 мкм и общих взвешенных частиц, отобранных с участков, расположенных вблизи границ испытательной площадки «Опытное поле» Семипалатинского испытательного полигона. Выявлено пространственное распределение концентраций исследуемых групп химических элементов, радионуклидов в почвенном покрове по «Восточному» следу радиоактивных выпадений. Проведенный корреляционный анализ содержания элементов в пробах воздуха позволил выявить ассоциацию элементов, характерных как для мелких частиц (PM-2,5), так и для общих взвешенных частиц воздуха испытательной площадки «Опытное поле» СИ Семипалатинского испытательного полигона. Содержание практически всех исследуемых химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха не превышает его допустимые уровни – предельно допустимые концентрации.

**Ключевые слова:**

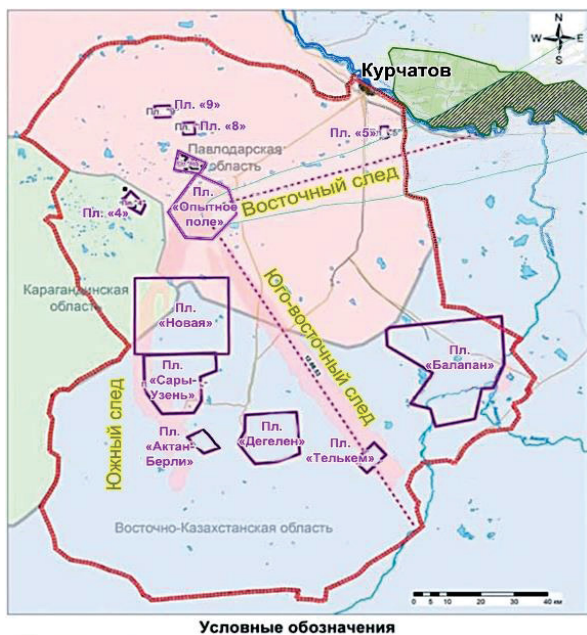
Почва, твердые частицы аэрозолей воздуха, приземный воздух, химические элементы, радионуклиды, ветровой перенос.

### Введение

На территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП) расположено несколько испытательных площадок, где проводились разнохарактерные ядерные взрывы, в том числе и площадка «Опытное поле», на которой проводились воздушные и наземные испытания, включающие как ядерные, так и гидро-ядерные взрывы [1, 2]. Наземные и воздушные ядерные испытания, проводившиеся с 1949 по 1962 гг., создали сложную, эволюционирующую во времени радиационную обстановку. Перенос продуктов воздуш-

ных и наземных ядерных взрывов воздушными потоками и их осаждение на поверхности земли образовали широкополосные и протяженные на сотни километров радиоактивные следы [3, 4]. К настоящему моменту на территории СИП выявлены три масштабных следа радиоактивных выпадений – «Южный» след, «Юго-Восточный» след и «Восточный» след (рис. 1). Все три радиоактивных следа были образованы вследствие проведения атмосферных (наземных и воздушных) ядерных испытаний в период с 1949 по 1962 гг. на площадке «Опытное поле» [5]. В результате гидро-

ядерных экспериментов выброшено большое количество альфа-активных радионуклидов, входящих в состав ядерного заряда [6]. «Восточный» след радиоактивных выпадений идентифицирован в результате радиоэкологического обследования прилегающих к СИП территорий в районе населенного пункта Долонь. При этом на территории СИП данный след практически не проявляется или проявляется совсем незначительно, фрагментарно, что, вероятнее всего, связано с неблагоприятными метеорологическими условиями на момент испытания (сильный порывистый ветер, дождь) [7].



**Рис. 1.** Основные следы радиоактивных выпадений СИП [5]  
**Fig. 1.** Main traces of STS radioactive fallout [5]

На сегодня радионуклидный и элементный состав компонентов природы «Восточного» следа мало изучены. Особый интерес среди них вызывает химический состав почвенного покрова, содержащий различные радионуклиды, тяжелые металлы и токсичные элементы. Очень мало было проведено работ по изучению элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха различных диаметров (2,5 мкм, 10 мкм и более) и почвы испытательной площадки «Опытное поле». Первые исследования распределения радионуклидов в составе различных аэродинамических частиц РМ от 0,1 до <10 мкм СИП проводились в начале 2000-х гг. [8]. Однако более детальное изучение уровней концентрации таких важных загрязнителей воздуха, как PM<sub>2,5</sub> и TSP, их химического состава в атмосферном воздухе СИП и прилегающих территорий остается в основном неизвестным.

Взвешенные вещества размером менее 10 мкм распространяются на большие расстояния и являются потенциальными загрязнителями основных компонентов природной среды [9–15]. Также эти твердые частицы аэрозолей воздуха содержат практически все

элементы литосферы, в том числе радиоактивные изотопы естественного и техногенного происхождения. Твердые частицы аэрозолей, выпадая на земную поверхность, принимают участие в формировании загрязнения почвы [16–34]. Актуальным остается вопрос о проведении исследований по определению содержания химических элементов в составе почвы по «Восточному» следу радиоактивных выпадений СИП для выявления пространственного распределения радионуклидов и тяжелых металлов, а также поступления в составе с твердыми частицами аэрозолей воздуха.

Целью представленной работы является оценка уровней накопления химических элементов в почвенном покрове в зоне воздействия «Восточного» следа Семипалатинского испытательного полигона, а также выявление возможного «привноса» радионуклидов с территории СИП на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа.

#### Объекты и методы исследования

В ходе проведения полевых работ были заложены:

- за пределами испытательной площадки «Опытное поле» СИП четыре исследовательских участка, расположенные на следах радиоактивных выпадений («Восточный», «Юго-Западный», «Южный» след), а также один пост на условно фоновом участке (г. Курчатов) для отбора проб почвы и твердых частиц аэрозолей воздуха (рис. 2);
- по профилю «Восточного» следа радиоактивных выпадений 14 точек для отбора проб почвы (рис. 2).

**Воздух.** Отбор проб общих взвешенных частиц аэрозолей воздуха (TSP – Total suspended particles) для элементного анализа проводили в течение 12 часов без перерыва переносным пробоотборником воздуха CF-993B с фиксированной скоростью. Использовали стекловолоконные фильтры (GF/F) диаметром 47 мм, представляющие собой многослойный прессованный волокнистый материал из боросиликатной основы. Фильтры из стекловолокна используются для высокоэффективной фильтрации – они задерживают мелкодисперсные частицы при высокой скорости фильтрации, обладают хорошей емкостью. Объем аспирированного воздуха был не менее 100 м<sup>3</sup>, что является репрезентативным для получения качественных данных.

Для определения радионуклидов в воздухе отбор проб воздушных аэрозолей проводился пробоотборником воздуха Бриз с производительностью 1500 м<sup>3</sup>/ч. на протяжении 24 ч, средний объем прокачанного воздуха составил около 40000 м<sup>3</sup>.

Среднесуточные пробы твердых частиц аэрозолей воздуха (PM<sub>2,5</sub> – Particulate matter – твердые частицы аэрозолей воздуха с диаметром менее 2,5 мкм) отбирали переносным пробоотборником воздуха MVS-6, который оснащен впускным трактом, позволяющим отсекаать крупные частицы с размерами более 2,5 мкм, с фиксированной скоростью на заложенных постах мониторинга. Для данного пробоотборника применяли фильтры типа QMA из высокочистых кварцевых



волокон. Пост был расположен на ровном участке ландшафта вдали от строений, леса и других препят-

ствий на высоте 1,5 м от поверхности земли с твердым, не пылящим покрытием.

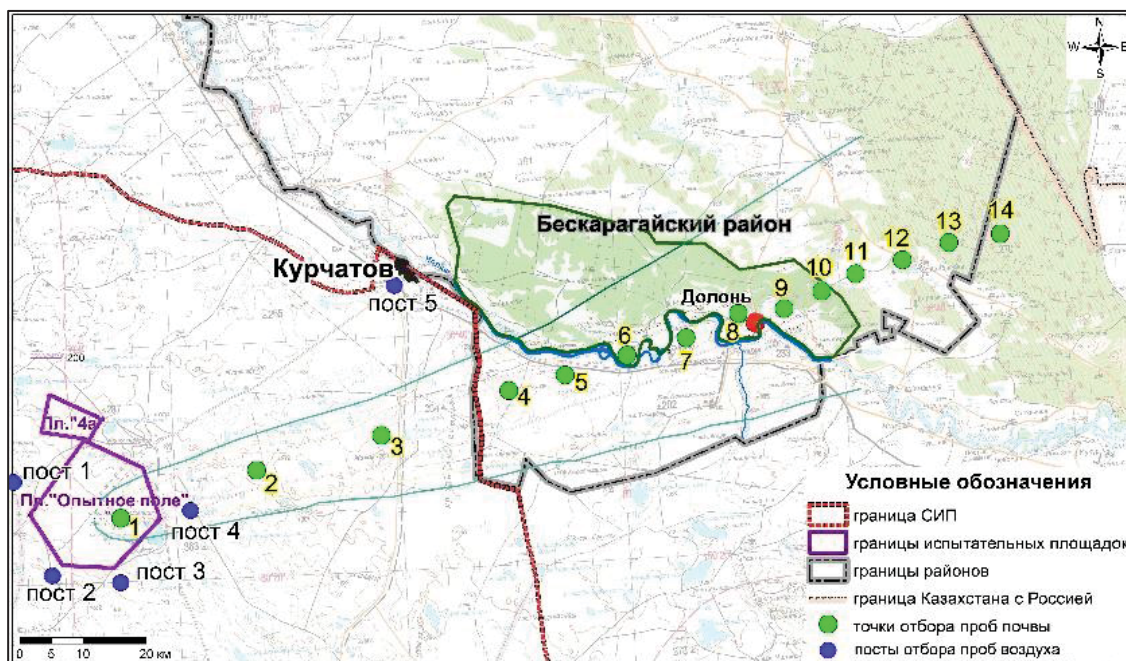


Рис. 2. Контур «Восточного» следа и точки отбора проб

Fig. 2. Contour of the «Vostochny» trace and sampling points

Все пробоотборное оборудование тщательно очищалось при каждой прокачке воздуха. При транспортировке фильтры хранились запечатанными в пластиковых специальных переносных емкостях. В каждой партии фильтров было по 1 неэкспонированному образцу (бланк) для определения фонового содержания веществ в фильтре.

**Почва.** С целью выявления возможного привнесения некоторых химических элементов и радионуклидов с территории СИП на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа на протяжении 140 км от источника были отобраны 14 образцов почвы с поверхностного слоя (0–10 см).

Для элементного анализа пробы твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5, TSP) и почвы подготовили способом автоклавного разложения, с использованием концентрированных фтористоводородной (HF – hydrofluoric acid), соляной (HCl – hydrochloric acid) и азотной (HNO<sub>3</sub> – nitric acid) кислот. Кислотную минерализацию образцов проводили в герметичных сосудах – автоклавах, при  $t 160 \pm 5$  °C от 2,5 до 4 часов в зависимости от полноты их разложения (полное растворение кристаллов силикатной матрицы).

Полученные после истирания гомогенные образцы почвы усредняли квартованием до навесок массой 10 г для радиохимического определения изотопов <sup>239+240</sup>Pu и навесок массой 50 г для определения <sup>90</sup>Sr. Для удаления органического вещества подготовленные навески почвы прокаливали в муфельной печи при 550 °C в течение 6 часов.

Радиохимический анализ по определению <sup>239+240</sup>Pu в пробах почвы проводили путем полного кислотного разложения исследуемых образцов почвы и переведе-

ния изотопов плутония в растворенное состояние. Для учета потерь и контроля химического выхода в исследуемые образцы предварительно вносили изотопную метку <sup>242</sup>Pu. Радиохимическое выделение и очистку изотопов плутония проводили с использованием сильноосновного анионита АВ 17-8 в нитратной форме.

Для определения содержания <sup>90</sup>Sr прокаленные навески почвы количественно переносили в химические стаканы и после внесения носителя Sr несколько раз обрабатывали при нагревании 6М раствором HCl с добавлением небольшого количества H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, каждый раз декантируя образующийся после кипячения кислотный выщелат в отдельный химический стакан. Полученный раствор использовали для выделения и очистки изотопов стронция путем последовательного осаждения гидроксидов и карбонатов. Выделенную фракцию стронция выдерживали в течение двух недель для установления радиоактивного равновесия между <sup>90</sup>Sr и его дочерним радионуклидом <sup>90</sup>Y.

В каждой партии воздушных фильтров, предназначенных для отбора проб твердых частиц аэрозолей воздуха, анализировали содержание химических элементов в чистых неэкспонированных образцах. Для проведения контроля качества пробоподготовки, а также анализа образцов почвы применен стандартный образец почвы, зарегистрированный в ГСИ РК с аттестованными значениями содержания элементов. Также для контроля за стадией растворения содержания труднорастворимых химических элементов по методу «введено–найдено» в соответствии с методикой выполнения измерений НСАМ № 499 «Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и

донных отложений» были использованы обогащенные изотопы Nd, Dy, Yb.

Анализ содержания химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы проводили методами ИСП-МС с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700× «Agilent Technologies», а также атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) ICAP 6000 Duo «Thermo Scientific» на базе лаборатории элементного анализа филиала Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан. Для построения градуировочных кривых применялись сертифицированные мультиэлементные стандартные образцы производства компании «Perkin Elmer», «Inorganic Ventures», США. При проведении анализа значения относительного стандартного отклонения (RSD – relative standard deviation) измерений составили менее 10 %. Контроль качества анализа осуществлялся путём измерения контрольного раствора через каждые 10 проб. При неудовлетворительном результате калибровки (отклонение калибровочного графика на 8–10 %) проводили перекалибровку прибора, при которой учитывали новые параметры фона.

Для определения удельной активности естественных и техногенных радионуклидов были применены методы альфа-, бета- и гамма-спектрометрии с использованием спектрометров AlphaAnalyst 7200-12 с PIPS детекторами, Quantulus 1220 с фотоэлектронным умножителем, BE3830 коаксиальным ОЧГ (особо чистый германий) детектором.

Также с применением растровой сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S3400N с ЭДС приставкой Bruker XFlash 4010 были изучены более 10 проб воздушных аэрозолей и 5 проб почвы на базе МИНОЦ им. Л.П. Рихванова «Урановая геология» НИ ТПУ с целью определения элементарных частиц изучаемых химических элементов.

Всего на исследовательских участках вблизи границ площадки «Опытное поле» отобрано 13 проб воздушных аэрозолей на определение радионуклидов в воздухе; 13 проб воздушных аэрозолей TSP, 13 проб воздушных аэрозолей PM-2,5 и 4 пробы почвы на определение химических элементов.

### Обсуждение результатов

Особенности радионуклидного и элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха

Величины запыленности атмосферного воздуха исследуемых участков сравнены с критериями оценки состояния атмосферного воздуха – ПДК взвешенных частиц – TSP и PM-2,5, выраженных в  $\text{мг}/\text{м}^3$ . Выявлено, что величина среднесуточной пылевой нагрузки общих взвешенных частиц составляет  $0,02 \text{ мг}/\text{м}^3$ , что ниже величины ПДК  $0,15 \text{ мг}/\text{м}^3$ , а по PM-2,5 –  $0,01 \text{ мг}/\text{м}^3$  (ПДК –  $0,035 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) [35]. Преимущественное направление ветра в период отбора проб вблизи границ площадки «Опытное поле» – северо-восточное.

По результатам проведенного гамма-спектрометрического анализа установлено [36], что объемная активность радионуклидов составила: для

$^{40}\text{K}$  – от  $<3,9 \cdot 10^{-6}$  до  $1,3 \cdot 10^{-5} \text{ Бк}/\text{м}^3$ ,  $^{232}\text{Th}$  –  $<1,5 \cdot 10^{-6} \text{ Бк}/\text{м}^3$ ,  $^{226}\text{Ra}$  –  $<8,9 \cdot 10^{-7} \text{ Бк}/\text{м}^3$ , для  $^{137}\text{Cs}$  –  $<5,3 \cdot 10^{-7} \text{ Бк}/\text{м}^3$ ,  $^{241}\text{Am}$  –  $<3,3 \cdot 10^{-7} \text{ Бк}/\text{м}^3$ . Анализ полученных данных показал, что объемная активность  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в воздушной среде не превысила значений допустимых объемных активностей для категории «население» (ДОАнас), установленных Гигиеническими нормативами [37].

В ходе проведения исследований установлено, что на фоновом посту № 5, расположенном на территории г. Курчатова, концентрации большинства исследуемых элементов в составе общих взвешенных частиц (TSP) в 2–15 раз выше, за исключением Cr, Cu, Zn, Cs, Eu и Pb, чем в пробах основных исследовательских участков вблизи границ испытательной площадки «Опытное поле». В составе пыли PM-2,5, отобранной за пределами границ юго-восточной и восточной частей испытательной площадки «Опытное поле», содержание большинства исследуемых элементов показало значение меньше предела обнаружения используемого аппаратурно-методического обеспечения (табл. 1).

**Таблица 1.** Содержание химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха (TSP, PM-2,5) испытательной площадки «Опытное поле» (пост № 1–4) и фоновой участка (г. Курчатова, пост № 5),  $\text{нг}/\text{м}^3$  ( $n=26$ )

**Table 1.** Element content in the composition of particulate air aerosols (TSP, PM-2,5) of the test site «Opytnoe pole» and background site (Kurchatov),  $\text{ng}/\text{m}^3$  ( $n=26$ )

Элементы Elements	Посты отбора проб/Sampling posts				
	1	2	3	4	5
Be	1,3 (1,0)*	0,6 (1,9)	0,5 (<0,01)	0,6 (<0,01)	1,9 (1,4)
V	22 (14,0)	11 (0,9)	12 (0,2)	12 (0,4)	30 (19)
Cr	33 (26)	36 (11)	36 (6)	21 (6)	51 (35)
Mn	240 (180)	90 (12)	100 (1,5)	100 (2,8)	370 (290)
Fe	3900 (4100)	1300 (3900)	1400 (310)	1500 (200)	6800 (5900)
Co	6,0 (3,2)	3,2 (1,0)	3,5 (0,1)	5,1 (<0,03)	7,8 (4,4)
Ni	3,9 (1,8)	<0,1 (<0,1)	4,6 (<0,1)	0,9 (<0,1)	8,1 (1,9)
Cu	360 (13)	110 (10)	16 (1,6)	37 (<0,1)	330 (12)
Zn	22000 (50)	22000 (70)	21500 (<25)	24000 (<25)	21000 (<25)
As	1960 (1800)	160 (80)	27 (0,9)	1,2 (<0,5)	270 (230)
Sr	1900 (2200)	690 (320)	580 (30)	730 (<0,1)	4800 (4400)
Mo	52 (6)	30 (12)	9 (<0,5)	22 (<0,5)	47 (9,5)
Cd	3,4 (3,2)	1,9 (<0,1)	1,8 (<0,1)	2,1 (<0,1)	4,9 (3,5)
Cs	11,0 (12)	0,6 (<0,1)	0,6 (<0,1)	0,4 (<0,1)	9,7 (9)
La	23 (27)	8 (54)	8 (<0,02)	10 (<0,02)	60 (55)
Ce	47 (47)	16 (94)	16 (<0,3)	23 (<0,3)	100 (85)
Pr	3,6 (4,0)	1,4 (8,2)	1,5 (<0,05)	2,0 (<0,05)	7,5 (6,8)
Nd	13,7 (16)	6,2 (16)	5,7 (<0,03)	8,6 (<0,03)	26,0 (24)
Sm	2,1 (2,3)	1,6 (4,7)	1,5 (<0,04)	2,0 (<0,04)	3,5 (3,2)
Eu	1,1 (0,8)	11,5 (1,4)	9,7 (<0,03)	11,7 (<0,03)	1,7 (1,1)
Gd	2,5 (2,5)	2,4 (5,2)	2,0 (<0,03)	2,9 (<0,03)	4,3 (3,6)
Pb	56 (46)	15 (5,8)	12 (1,0)	17 (1,1)	35 (17)
Th	2,6 (2,4)	2,2 (1,5)	2,4 (<0,05)	2,7 (<0,05)	6,7 (6,0)
U	9,6 (10)	1,3 (22)	1,3 (<0,05)	1,4 (<0,05)	19,0 (16,0)

Примечание: \* – в скобках содержание элементов в PM-2,5.

Note: \* – in parentheses – element content in PM-2,5.

Пространственное распределение содержания химических элементов в составе TSP, отобранных за пределами границ испытательной площадки «Опыт-

ное поле», более стабильно относительно характера их распределения в составе более мелких частиц аэрозолей воздуха. При этом следует отметить, что за пределами границы западной части исследуемой площадки и на условно фоновом участке (территория г. Курчатова) накопление содержания большинства химических элементов, включая некоторые редкоземельные элементы, в различных фракциях твердых частиц аэрозолей воздуха происходит одинаково, за исключением некоторых тяжелых металлов. Концентрация V, Co, Ni, Cu, Zn, Mo в составе общей взвеси пыли с западного поста превышает их содержание в составе частиц PM-2,5 от 2 до 100 раз. На обследуемом участке территории г. Курчатова, помимо перечисленных элементов, отмечено превышение содержания Cr и Pb в составе TSP в 2 раза в сравнении с их концентрацией в PM-2,5. Данного рода распределение перечисленных элементов в различных фракциях пыли указывает на разнородность их содержания и различные источники поступления. Известно, что более мелкие частицы в большинстве своем «странствуют» и источники их формирования могут быть расположены за 100 км от места отбора проб [38]. 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. Далее в результатах по обследованию почв авторами выявлено стабильное распределение этих групп элементов по всему профилю «Восточного» следа.

Что касается равномерно распределенных элементов в крупно- и тонкодисперсных фракциях пыли, то отмечены относительно высокие концентрации максимальных значений группы редкоземельных элементов, таких как La, Ce, Pr, Nd, в составе образцов воздушных аэрозолей, отобранных с постов № 1 (рядом с границей западной части площадки «Опытное поле») и № 5 (фоновый участок г. Курчатова) в сравнении с их содержанием в составе TSP, отобранных с постов № 2 (рядом с границей южной части площадки «Опытное поле»), № 3 (рядом с границей юго-восточной части площадки «Опытное поле») и № 4 (рядом с границей восточной части площадки «Опытное поле»). Превышение по La, Ce, Pr составило от 2 до 3 раз, Nd – в 2 раза соответственно. Содержание остальной группы редкоземельных элементов (Sm, Gd) в составе TSP на всех исследуемых постах распределено равномерно. Исключение составил Eu, концентрация данного элемента в составе TSP, отобранных с постов № 2, 3, 4, превышает в 10 раз его содержание в частицах пыли, собранных с участков № 1 и 5.

Содержание Th в образцах пыли условно фонового поста № 5 превышает в 2 раза его концентрацию в основных постах исследования вблизи границ площадки «Опытное поле» СИП, что, возможно, свидетельствует о дополнительном источнике поступления данного элемента.

Также по полученным результатам можно выделить специфичное поведение Zn в составе общей пы-

ли. В целом концентрация данного элемента в составе общей пыли со всех исследуемых постов абсолютно идентична, в среднем около 22000 нг/м<sup>3</sup>, что, возможно, свидетельствует об однородности источника поступления (почва) по содержанию данного элемента.

Проведен корреляционный анализ между содержанием химических элементов в составе исследуемых частиц аэрозолей воздуха. По полученным данным выявлены высокие положительные (0,97 %) корреляционные зависимости между содержанием некоторых исследуемых элементов в составе крупных частиц аэрозолей воздуха. Так, например, положительная зависимость установлена для U с Fe, Co, Sr, Cd, Pr, Nd, Sm, а также фиксируется связь между Fe, Co, Sr, Cd, Pr, Nd, Sm с La и Ce в образцах пыли. Отмечается взаимосвязь концентрации в составе пыли As с содержанием Cs, а также выявлена высокая связь Be с большинством химических элементов, что говорит об их одном источнике поступления.

В крупных частицах аэрозолей воздуха для Eu устанавливается обратная корреляционная зависимость с отдельными элементами, что свидетельствует о различных источниках поступления. Для решения этого вопроса необходимо проведение дополнительных исследований.

Проведенный корреляционный анализ между содержанием химических элементов в составе частиц воздуха размером менее 2,5 мкм выявил схожую динамику зависимости концентрации ряда элементов, как и в TSP. Так, в составе PM-2,5 концентрация Pr, Nd, Sm коррелирует с содержанием Ce и U.

Также отмечены определенные различия в накоплении химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха различных диаметров (TSP, PM-2,5). В постах отбора № 2, 3 и 4 концентрация исследуемых элементов от 2 до 10000 раз превышает содержание их в PM-2,5. В постах № 1 и 5 содержание большинства химических элементов в составе TSP и PM-2,5 идентично, за исключением V, Co, Ni, Mo и Pb. По результатам проведенного элементного анализа установлено, что содержание исследуемых групп элементов не превышает предельно допустимые концентрации (ПДК).

По стабильному содержанию V, Cr, Mn, Fe, Co, Zn, Cd, Sm, Gd и Th в крупных частицах аэрозолей воздуха можно предположить, что источником их формирования является почвенный покров.

Источником поступления редкоземельных элементов в аэрозоли воздуха можно предположить почвы, поскольку в нижеприведенных результатах (рис. 3, а) отмечается увеличение содержания элементов редкоземельной группы от внешних границ площадки «Опытное поле» в восточном направлении. Относительно высокие содержания данной группы элементов в образцах пыли, отобранной с территории г. Курчатова, в сравнении с их концентрацией в образцах с «Опытного поля», возможно, связано с наличием отходов (зола) котельной и их локальным распространением по почвенному покрову города. В целом взаимосвязи между содержанием элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха испытательной пло-



щадки «Опытное поле» и условно фоновой территории г. Курчатова не наблюдается.

#### Особенности радионуклидного состава почвы

Масштабы и уровни радиоактивных загрязнений после ядерных взрывов зависят от многих факторов: типа ядерных боеприпасов, вида взрывов, мощности, топографических и метеорологических условий. Основными долгоживущими радионуклидами при ядерном взрыве являются  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Количество долгоживущих радионуклидов сначала нарастает, а затем, достигнув максимума, уменьшается. Часть образовавшихся при наземном взрыве радиоактивных продуктов (деления и активации), поднятых с грунтом, оседает непосредственно на месте проведения взрыва. Некоторая часть, связанная со сравнительно небольшими частицами грунта или расплавленных пород, может быть отнесена ветром на значительные расстояния от места взрыва. В результате этого, возможно, образуется радиоактивное загрязнение окружающей среды.

С целью выявления уровней накопления техногенных и естественных радионуклидов в почвенном покрове в зоне воздействия «Восточного» следа СИП были проанализированы образцы почв по профилю (табл. 2, 3).

**Таблица 2.** Содержание техногенных радионуклидов в образцах почв по профилю «Восточного» следа СИП, Бк/кг

**Table 2.** Content of man-made radionuclides in soil samples along the profile of the «Vostochny» trace of STS, Bq/kg

Расстояние, км Distance, km	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$	$^{60}\text{Co}$	$^{152}\text{Eu}$	$^{235}\text{U}$	$^{239+240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Am}$
0	22,0±4,0	3,1±1,0	<0,8	<1,1	<2	110,0±6,8	9,5±1,9
22	17,0±3,0	<0,8	<0,5	<0,7	<1,3	53,0±4,8	3,3±0,7
42	6,8±1,4	<0,7	<0,9	<1,2	<3	13,0±2,2	<0,8
62	21,0±4,0	1,5±0,6	<0,7	<1,4	<3	12,0±2,4	<0,9
72	3,6±0,7	<0,6	<0,8	<1,4	<3	0,9±0,4	<0,9
82	12,0±2,0	<0,5	<0,5	<0,7	<2	13,0±1,8	<0,5
92	1,9±0,4	3,2±0,7	<0,5	<0,7	<1,3	2,3±0,8	<0,4
98	9,1±1,8	<0,5	<0,5	<0,7	<3	25,0±2,7	<0,4
104	4,1±0,8	2,0±0,7	<1,1	<1,5	<1,3	1,5±0,6	<1,0
110	5,8±1,2	<0,6	<0,5	<0,7	<1,2	4,2±1,0	<0,4
116	3,4±0,7	3,3±0,9	<0,8	<1,2	<1,3	1,4±0,6	<0,7
122	6,7±1,3	5,7±0,9	<1,1	<1,4	<3	2,1±0,8	<0,9
130	31,0±6,0	<0,6	<1,3	<1,7	<2	43,0±2,8	<1,2
140	35,0±7,0	3,4±0,8	<1	<1,5	<3	49,0±3,5	2,6±0,5

По представленным данным распределение содержания  $^{90}\text{Sr}$  в исследуемых образцах почвы основного радиоактивного следа имеет эпизодичный характер в сравнении с распределением техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . Так, не выявлены удельные активности  $^{90}\text{Sr}$  на отметках 22, 42, 72, 82, 98, 110, 130 км от границ «Опытного поля» СИП. При этом следует отметить, что выявленные значимые показатели удельной активности данного техногенного изотопа на протяжении всей траектории не имеют пиковых значений. Данные варьируют в пределах от 1,5 до 5,7 Бк/кг.

Для содержания изотопа  $^{137}\text{Cs}$  в образцах почвы характерно более динамичное распределение. Так, в начале отрезка на отметках 0 и 22 км выявлены значения удельной активности, равные 22 и 15 Бк/кг соответственно. На отрезках от 72 до 122 км включительно показатели удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  падают до 1,9 Бк/кг. Далее на отрезках 130–140 км наблюдается резкое повышение значений удельной активности. Также следует отметить, что на протяжении всего профиля были получены значимые содержания данного радионуклида в образцах почвы.

Техногенные радионуклиды  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{235}\text{U}$  не обнаружены на протяжении всего «Восточного» следа. Величина удельной активности  $^{239+240}\text{Pu}$  в почвенном покрове исследуемой зоны изменяется от 0,9 до 110,0 Бк/кг. Максимальные значения удельной активности изотопов плутония были обнаружены в образцах почвы, отобранных непосредственно с территории испытательной площадки «Опытное поле» СИП (рис. 2, точка 1). При этом следует отметить, что данное значение не превышает показателя минимальной удельной значимой активности (МЗУА). Распределение содержания  $^{239+240}\text{Pu}$  имеет нестабильный характер. В начале и на 130–140 км профиля обнаружены значения удельных активностей 53, 43 и 49 Бк/кг, соответственно. В условно обозначенной «середине» профиля величина удельной активности изотопов плутония составила от 0,9 до 25 Бк/кг. Значимые показатели  $^{241}\text{Am}$  в почвах «Восточного» следа были обнаружены на 0, 22 и 140 км. Практически на протяжении всей траектории радиоактивного следа в исследуемых образцах почвы не обнаружен данный радиоактивный изотоп.

Радионуклидный состав почв по профилю «Восточного» следа определяется в основном содержанием  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . По выявленным концентрациям данных радионуклидов наблюдается неоднородное распределение по всему 130 км профилю от внешних границ «Опытного поля». Данного рода распределение, а именно резкое снижение удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ , вероятно, связано с наличием пастбищных участков на исследуемой территории.

Также следует отметить, что проведен более детальный анализ образцов почвы, отобранных по профилю «Восточного» следа, на содержание естественных радионуклидов. Естественная радиоактивность на местах радиоактивного следа в большей степени определяется присутствием в почвенном профиле  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ , что согласуется в целом с результатами других авторов [39–43] и наглядно представлено в табл. 3.

Выявленная удельная активность  $^{40}\text{K}$  находится в диапазоне от 520 до 790 Бк/кг. Максимальное содержание исследуемого естественного радионуклида отмечается на 140 км от испытательной площадки «Опытное поле», минимальное – на 22 км, соответственно. Важно отметить, что содержание стабильного изотопа калия с атомной массой 39 в исследуемых образцах почвы по профилю колеблется от 15000 до 24000 мг/кг, что находится на уровне одного кларка со средним его содержанием в континентальной земной коре.

**Таблица 3.** Содержание естественных радионуклидов в образцах почв по профилю «Восточного» следа СИП, Бк/кг

**Table 3.** Content of natural radionuclides in soil samples along the profile of the «Vostochny» trace of STS, Bq/kg

Расстояние, км Distance, km	$^{40}\text{K}$	$^{232}\text{Th}$	$^{210}\text{Pb}$	$^{238}\text{U}$
0	550 ± 110	22,0 ± 4,0	58 ± 12	17,0 ± 2,6
22	520 ± 100	17,0 ± 3,0	50 ± 10	18,0 ± 2,9
42	580 ± 120	28,0 ± 6,0	36 ± 7	20,0 ± 3,2
62	600 ± 120	21,0 ± 4,0	69 ± 14	17,0 ± 2,7
72	610 ± 120	23,0 ± 5,0	35 ± 7	18,0 ± 2,8
82	750 ± 150	13,0 ± 3,0	51 ± 10	9,7 ± 1,5
92	780 ± 160	27,0 ± 5,0	28 ± 6	17,0 ± 2,6
98	770 ± 150	16,0 ± 3,0	33 ± 7	13,0 ± 2,1
104	560 ± 110	9,0 ± 1,8	56 ± 11	11,0 ± 1,8
110	680 ± 140	28,0 ± 6,0	43 ± 9	15,2 ± 2,4
116	530 ± 110	18,0 ± 4,0	81 ± 16	13,2 ± 2,1
122	730 ± 150	49,0 ± 10,0	50 ± 10	34,0 ± 5,4
130	530 ± 110	24,0 ± 5,0	58 ± 12	12,0 ± 1,9
140	790 ± 160	22,0 ± 4,0	44 ± 9	18,0 ± 2,9

По всей длине профиля поведение естественного радионуклида  $^{232}\text{Th}$  в почве более динамично. Так, наблюдается резкое понижение удельной активности

$^{232}\text{Th}$  на отрезке 104 км, однако уже на 122 км его содержание повышается до отметки 49 Бк/кг.

Активность  $^{210}\text{Pb}$  в почвах имеет чуть большие значения в сравнении с показателями активности  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  и варьирует в пределах от 28 до 81 Бк/кг.

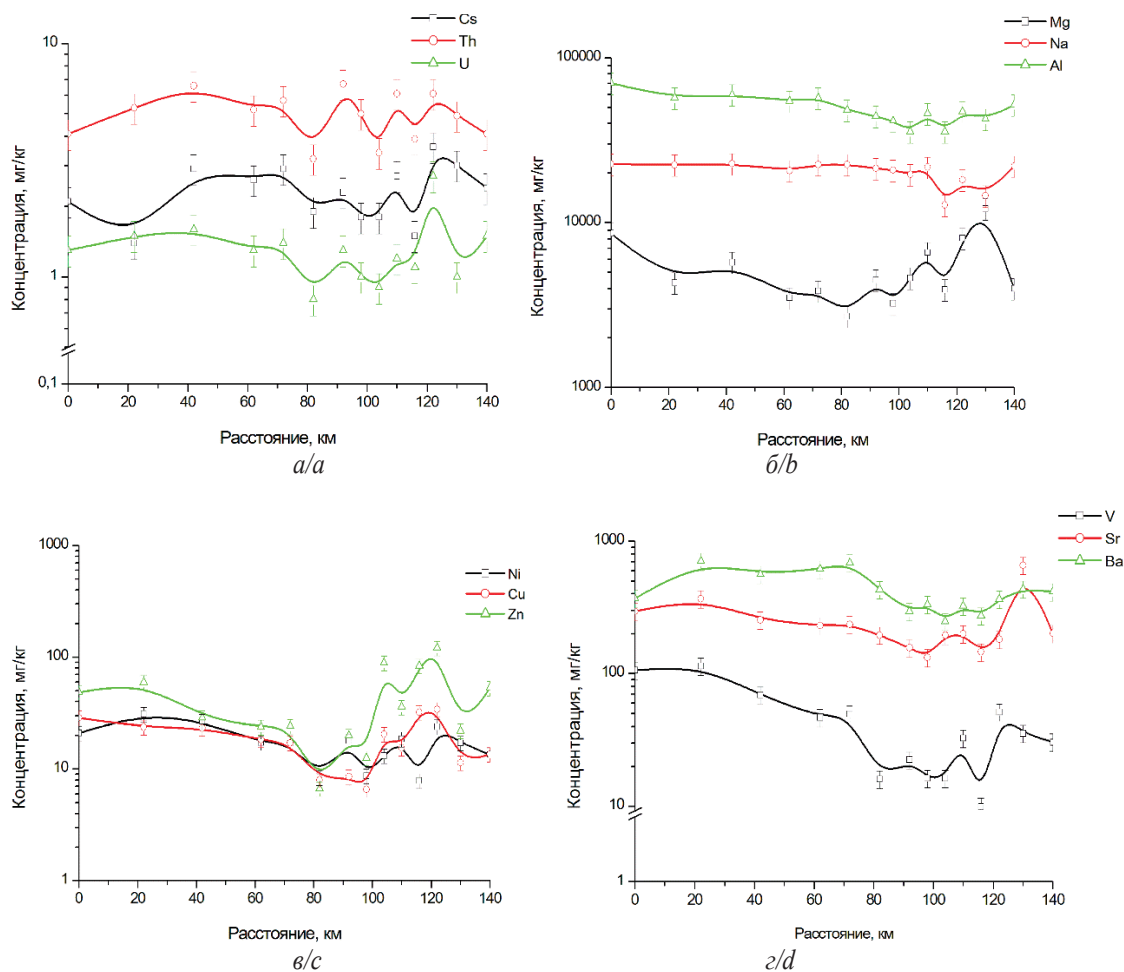
Концентрация  $^{238}\text{U}$  в почвах изучаемой территории также была значительно ниже содержания  $^{40}\text{K}$ , и максимальное его значение составляет 34 Бк/кг на 122 км. Самое низкое

содержание данного изотопа выявлено на 82 км и составило 9,7 Бк/кг.

По «Восточному» следу радиоактивных выпадений в образцах почвы концентрация естественных радионуклидов распределена равномерно. Из этого следует, что состав почвы абсолютно идентичен по содержанию указанных радионуклидов на протяжении всего следа.

#### Особенности элементного состава почвы

По результатам элементного анализа состава образцов почв, отобранных по профилю «Восточного» следа, наблюдается стабильность динамики распределения содержания большинства исследуемых химических элементов на протяжении всего профиля (рис. 3, а–г).



**Рис. 3.** Пространственное распределение содержания Cs, Th, U (а), Mg, Na, Al (б), Ni, Cu, Zn (в), V, Sr, Ba (г) в почвах по профилю «Восточного» следа

**Fig 3.** Spatial distribution of Cs, Th, U (a), Mg, Na, Al (b), Ni, Cu, Zn (c), V, Sr, Ba (d) content in soils along the profile of the «Vostochny» trace

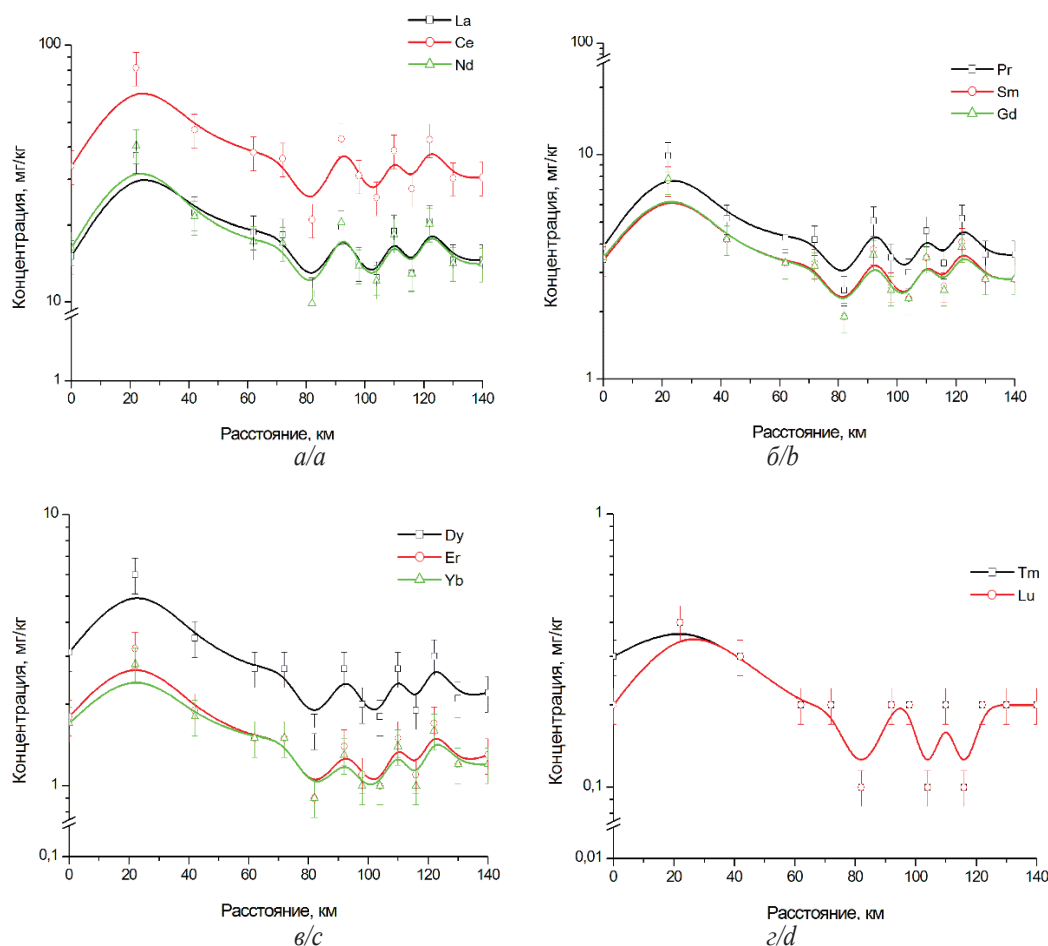
Как видно из данных, в исследуемых образцах почвы содержание представленных групп элементов показало стабильную динамику распределения на отрезке от 0 до 72 км «Восточного» профиля. Исключение из этой группы элементов составляют Na и Al, концентрация их практически стабильна на протяжении всего профиля.

Незначительные пики возрастания концентрации таких элементов, как Cu, Zn, отмечены на расстоянии от 100 до 140 км. Схожую картину по динамике распределения содержания имеет Mg. Его максимальный

пик содержания отмечен на отрезке от 120 до 140 км. Наблюдается незначительное понижение содержания V в образцах почвы по мере удаления от внешних границ СИП.

Следует отметить, что выявленные концентрации Zn и Sr на отметке 122 км превышают их средние содержания в земной коре в 1,6 и 2,4 раза соответственно.

Также выявлена группа элементов, содержание которых имеет схожую динамику распределения в исследуемых образцах почвы по всему профилю (рис. 4, а–г)



**Рис. 4.** Пространственное распределение содержания La, Ce, Nd (а), Pr, Sm, Gd (б), Dy, Er, Yb (в), Tm, Lu (г) в почвах по профилю «Восточного» следа

**Fig 4.** Spatial distribution of La, Ce, Nd (a), Pr, Sm, Gd (b), Dy, Er, Yb (c), Tm, Lu (d) content in soils along the profile of the «Vostochny» trace

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. Это особенно четко выражено в динамике поведения концентрации Tm и Lu на отрезке от 80 до 130 км. Также разница между максимальными и минимальными содержаниями всех исследуемых редкоземельных элементов в образцах почвы

увеличивается в 4 раза. Далее приведены результаты электронной микроскопии образцов почвы, отобранных по профилю «Восточного» следа (рис. 5, а, б).

В ранее проведенных исследованиях по определению содержания химических элементов в образцах почвы, отобранных с территории малого населенного пункта Долонь, непосредственно находящегося в зоне «Восточного» следа радиоактивных выпадений, выявлено схожее распределение концентрации изучаемых химических элементов [44]. Так, например, в образцах почвы обнаружены схожие концентрации элементов La (17,9 мг/кг), Ce (37,6 мг/кг), Pr (4,4), Nd (17,8), Sm (3,5), что абсолютно согласуется с их содержанием,



выявленным в пробах почвы профиля «Восточного» следа. Также следует отметить, что методом сканирующей микроскопии в образцах почвы Долонь были обнаружены частицы меди, как и в почвах исследуемого следа. В двух других населенных пунктах (Бескарагай и Канонерка) [44], расположенных вне зоны воз-

действия «Восточного» следа радиоактивных выпадений, аналогичного поведения исследуемых химических элементов в почве не выявлено. В связи с чем можно предположить, что есть привнесения некоторых химических элементов с территории СИП на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа.

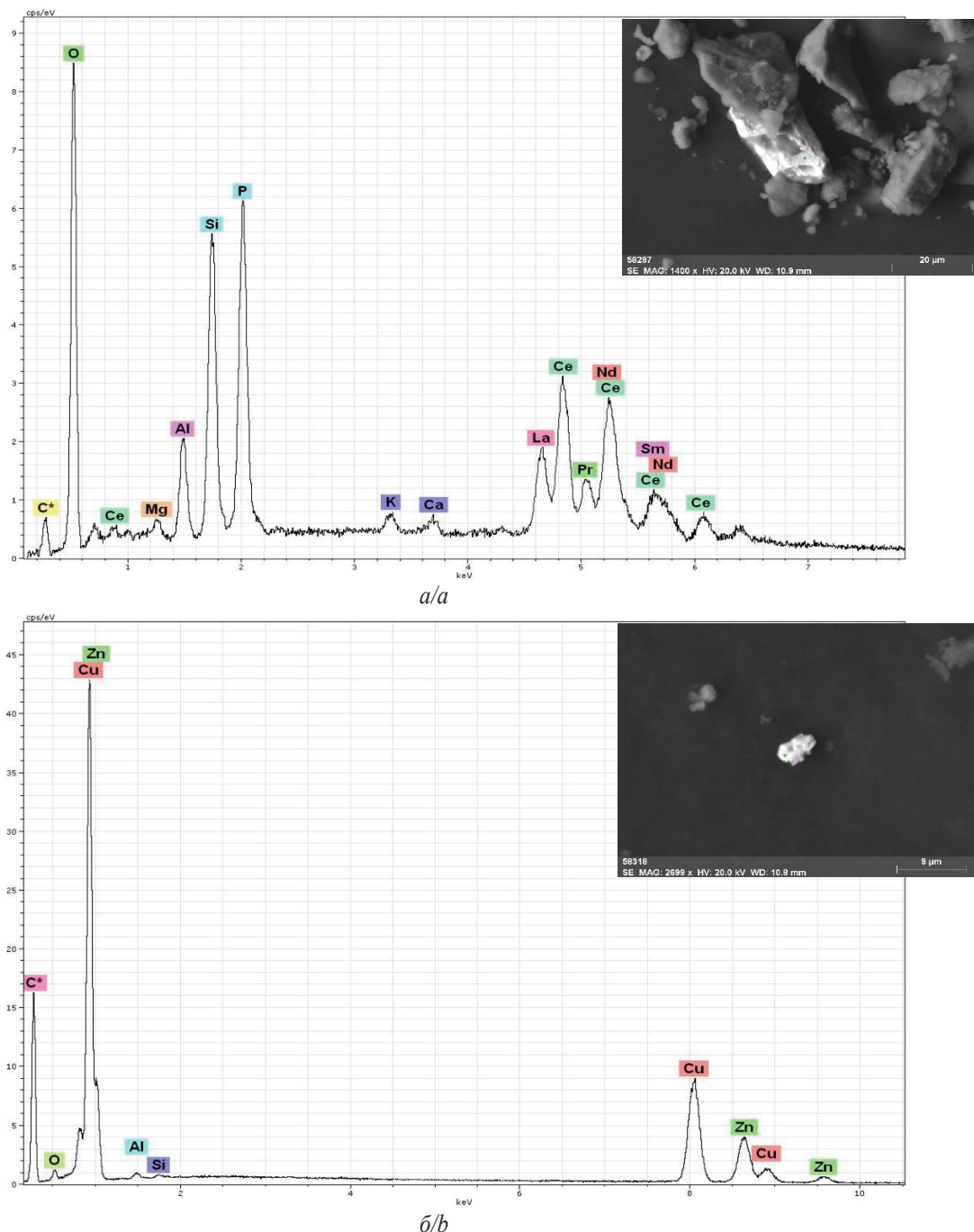


Рис. 5. Образец почвы «Восточного» профиля 42 км: а) редкоземельный минерал; б) Cu-Zn- частица  
 Fig 5. Soil sample of the «Vostochny» profile, 42 km: a) rare-earth mineral; b) Cu-Zn-particle

### Заключение

В целом можно сделать вывод, что в формировании химического состава воздушных аэрозолей «Восточного» следа Семипалатинского испытательного полигона участвует почвенный покров. Причем явной

зависимости между содержанием элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха испытательной площадки «Опытное поле» и условно фоновой территории г. Курчатова не наблюдается. Содержание исследуемых групп элементов в воздушных аэрозолях не превышают предельно допустимые концентрации.

По «Восточному» следу радиоактивных выпадений в образцах почвы концентрация естественных радионуклидов распределена равномерно.

Техногенные радионуклиды  $^{60}\text{Co}$  и  $^{152}\text{Eu}$ , как основные радионуклиды продуктов активации, не обнаружены на протяжении всего «Восточного» следа, а также на протяжении всей траектории радиоактивного следа в исследуемых образцах почвы не обнаружен радиоактивный изотоп  $^{241}\text{Am}$ . Были выявлены значимые содержания  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемых образцах почвы в сравнении с изотопом  $^{90}\text{Sr}$ . Данный радионуклид проявляется местами. Не установлено превышения фона глобальных выпадений по значениям, выявленным в исследуемых образцах почвы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ .

По профилю «Восточного» следа обнаружено динамичное распределение содержания  $^{239+240}\text{Pu}$ , где его концентрация колеблется от 0,9 до 110 Бк/кг. Максимальное значение выявлено в пробе почвы, отобранной непосредственно с участка «Опытное поле» (проба, отобранная на условно «0» км, точка № 1). При этом следует отметить, что данное значение не превышает показателя минимальной удельной значимой активности.

Радионуклидный состав почв прилегающих территорий по профилю «Восточного» следа определяется в основном содержанием  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$ . По выявленным концентрациям  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{241}\text{Am}$  в исследуемых образцах почвы не представляется возможность описания их пространственной динамики по следу радиоактивных выпадений. Однако устанавливается неоднородное распределение радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{239+240}\text{Pu}$  по профилю «Восточного» следа.

Для группы редкоземельных элементов в почвах профиля «Восточного» следа выявлена одна особенность, которая характеризуется максимальным пиком

их содержания на 22 км, а далее по профилю содержание их стабильно понижается до отметки 82 км. Относительно стабильную динамику распределения содержания по всему профилю показали следующие элементы: Cs, Th, U, Mg, Na, Al. Выявленное содержание большинства исследуемых химических элементов в образцах почвы по «Восточному» следу абсолютно идентично с их ранее определенной концентрацией в пробах почвы с населенного пункта Долонь. В двух других населенных пунктах (Бескарагай и Канонерка), расположенных вне зоны воздействия «Восточного» следа, радиоактивных выпадений явной схожести динамики распределения исследуемых групп химических элементов в почве не было выявлено. В связи с чем можно предполагать, что с территории СИП есть привнесения некоторых химических элементов на прилегающие территории по профилю «Восточного» следа.

Таким образом, привнесение твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5 и TSP) в г. Курчатова с ближайшей к нему испытательной площадки «Опытное поле» не выявлено. Однако отмечаются факты сходства химического состава частиц аэрозолей в воздухе в районе прохождения «Восточного» следа радиоактивных выпадений 1949 г., а также в районе малого населенного пункта Долонь с химическим составом почв вблизи площадки «Опытное поле», что может говорить о некоторой связи этих территорий. Однако механизм такого проявления требует предметного изучения.

*Работы частично выполнялись в рамках 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 ИРБЭ РГП НЯЦ РК.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Особенности состава, форм нахождения и распределения радионуклидов на различных площадках СИП / К.К. Кадыржанов, С. Хажекбер, И.В. Казачевский, В.П. Солодухин, С.Н. Лукашенко // Вестник НЯЦ РК Радиоэкология. Охрана окружающей среды. – 2000. – № 3. – С. 15–22.
- Акчурин И.А. Семипалатинский ядерный полигон. Создание становление, деятельность. – М.: Изд-во «Голден-Би», 2007. – 258 с.
- Логачев В.А. Ядерные испытания на Семипалатинском полигоне и их влияние на окружающую среду // Вестник НЯЦ РК Радиоэкология. Охрана окружающей среды. – 2000. – № 3. – С. 9–14.
- Умаров М.А., Артемьев О.И. Радиоактивные выпадения от атмосферных ядерных испытаний // Вестник НЯЦ РК Радиоэкология. Охрана окружающей среды. – 2001. – № 3. – С. 20–25.
- Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиоэкологии Казахстана. Вып. 5. – Павлодар: Дом печати, 2015. – 356 с.
- Ядерные испытания СССР. Гидродерные эксперименты. Инвентаризация затрат плутония / И.А. Андрюшин, Н.П. Волошин, Р.И. Илькаев, А.М. Матушенко, В.Н. Михайлов, А.К. Чернышев // Инф. бюлл. ЦНИИАтоминформ. – 1998. – № 12. – С. 60–63.
- Логачев В.А. Влияния ядерных испытаний на Семипалатинском полигоне на состояние здоровья населения Кемеровской и Новосибирской областей // Бюллетень центра общественной информации по атомной энергии. – 1996. – Спецвыпуск (март). – С. 9–15.
- Комплексные исследования радиоактивного загрязнения системы «Атмосфера – подстилающая поверхность» и оценки радиационных рисков для населения Семипалатинского региона / О.И. Артемьев, А.Ю. Осинцев, Я.И. Газиев, И.И. Крышев, С.К. Гордеев, И.Я. Газиев, А.И. Крышев, Л.В. Колесникова, Б.И. Огородников, В.П. Мартыненко, А.Д. Уваров // Вестник НЯЦ РК. – 2007. – № 4. – С. 44–52.
- Characteristics and pollution formation mechanism of atmospheric fine particles in the megacity of Chengdu, China / L. Chen, J. Zhang, X. Huang, H. Li, G. Dong, S. Wei // Atmospheric Research. – 2022. – V. 273. – 106172. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106172> (дата обращения 03.05.2022).
- Analysis of aerosol particle number size distribution and source attribution at three megacities in China / D. Zhang, Z. Li, H. Wu, T. Wu, R. Ren, Z. Cai, C. Liang, L. Chen // Atmospheric Environment. – 2022. – V. 279. – 119114. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119114> (дата обращения 03.05.2022).
- Pollution characteristics, transport pathways, and potential source regions of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Changchun City in 2018 / F. Meng, J. Wang, T. Li, C. Fang // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – V. 17(18). – 6585. URL: <https://doi.org/10.3390/ijerph17186585> (дата обращения 03.05.2022).
- Cho J.-H., Kim H.-S., Yoon M.-B. The influence of atmospheric blocking on regional PM<sub>10</sub> aerosol transport to South Korea during February–March of 2019 // Atmospheric Environment. – 2022. – V. 277. – 119056. URL: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119056> (дата обращения 03.05.2022).

13. Characterization of aerosol pollution in two Hungarian cities in winter 2009–2010 / E. Furu, A. Angyal, Z. Szoboszlai, E. Papp, Z. Török, Z. Kertész // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13 (4). – 554. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13040554> (дата обращения 03.05.2022).
14. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020–2021: episodes of extreme air pollution of different genesis / D.P. Gubanova, A.A. Vinogradova, M.A. Iordanskii, A.I. Skorokhod // *Atmosphere*. – 2022. – V. 13(4). – 574. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13040574> (дата обращения 03.05.2022).
15. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions / J. Xiong, Z. Tianliang, B. Yongqing, L. Yu, H. Yongxiang, G. Chunwei // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 2020. – V. 209. – 105415. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105415> (дата обращения 03.05.2022).
16. Spring aerosol in urban atmosphere of megacity: analytical and statistical assessment for source impacts / O. Popovicheva, S. Padoan, J. Schnelle-Kreis, D.L. Nguyen, T. Adam, M. Kistler, T. Steinkogler, A. Kasper-Giebl, R. Zimmermann, N. Chubarova // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2020. – V. 20. – № 4. – P. 702–719. URL: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.08.0412> (дата обращения 03.05.2022).
17. Smoke aerosols dispersion and transport from the 2013 New South Wales (Australia) bushfires / H.N. Duc, L.T.C. Chang, M. Azzi, J. Ningbo // *Environmental monitoring and assessment*. – 2018. – V. 190. – № 7. – 428. URL: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6810-4> (дата обращения 03.05.2022).
18. Detection of Saharan mineral dust aerosol transport over Brazilian northeast through a depolarization lidar / A.G. Guedes, E. Landulfo, E. Montilla-Rosero, F.J.S. Lopes, J.J. Hoelzelmann, J.H. Fernandez, M.P.A. Silva, R.S.S. Santos, J.L. Guerrero-Rascado, L. Alados-Arboledas // *EPJ Web of Conferences*. – EDP Sciences, 2018. – V. 176. – 05036. URL: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817605036> (дата обращения 03.05.2022).
19. The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles / M. Van Der Does, P. Knippertz, P. Zschenderlein, R.G. Harrison, J.-B.W. Stuut // *Science advances*. – 2018. – V. 4. – № 12. – eaau2768. DOI: 10.1126/sciadv.aau2768
20. Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments / D.P. Gubanova, N.F. Elansky, A.I. Skorokhod, T.M. Kuderina, M.A. Iordanskii, N.V. Sadovskaya, P.P. Anikin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2020. – Т. 606. – № 1. – 012019. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012019> (дата обращения 03.05.2022).
21. Elemental composition of aerosols in the near-surface air of Moscow: seasonal changes in 2019 and 2020 / D.P. Gubanova, M.A. Iordanskii, T.M. Kuderina, A.I. Skorokhod, N.F. Elansky, V.M. Minashkin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2021. – V. 34. – № 5. – P. 475–482. DOI: 10.1134/S1024856021050122
22. Chemical composition and source apportionment of atmospheric aerosols on the Namibian coast / D. Kloppe, P. Formenti, A. Namwoonde, M. Cazaunau, S. Chevallier, A. Feron, C. Gaimoz, P. Hease, F. Lahmidi, C. Mirande-Bret, S. Triquet, Z. Zeng, S.J. Piketh // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2020. – V. 20. – № 24. – P. 15811–15833. URL: <https://doi.org/10.5194/acp-20-15811-2020> (дата обращения 03.05.2022).
23. Elemental composition of dust aerosols near cement plants based on the study of samples of the solid phase of the snow cover / D.A. Volodina, A.V. Talovskaya, A.Y. Devyatova, A.V. Edelev, E.G. Yazikov // *Pure and Applied Chemistry*. – 2022. – 94 (3). – P. 269–274. URL: <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0315> (дата обращения 03.05.2022).
24. Analysis of the content of chemical elements in aerosols using data from passive sampling at Fonovaya observatory / V.S. Buchelnikov, A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, D.V. Simonenkov, B.D. Belan, M.P. Tentyukov // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2020. – 33 (5). – P. 490–495. DOI: 10.1134/S1024856020050061
25. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, E.A. Filimonenko, J.-C. Lata, J. Kim, T.S. Shakhova // *Environmental Technology* (United Kingdom). – 2018. – 39 (18). – P. 2288–2303. DOI: 10.1080/09593330.2017.1354075
26. Gaberssek M., Watts M.J., Gosar M. Attic dust: an archive of historical air contamination of the urban environment and potential hazard to health? // *Journal of Hazardous Materials*. – 2022. – V. 432. – 128745. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128745> (дата обращения 03.05.2022).
27. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity / D. Vlasov, N. Kasimov, I. Eremina, G. Shinkareva, N. Chubarova // *Atmospheric Pollution Research*. – 2021. – V. 12 (1). – P. 255–271. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012> (дата обращения 03.05.2022).
28. Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // *Applied Geochemistry*. – 2020. – V. 122. – 104723. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104723> (дата обращения 03.05.2022).
29. Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in Nanjing, a megacity in southeastern China / X. Zhang, X. Zhao, G. Ji, R. Ying, Y. Shan, Y. Lin // *Journal of Atmospheric Chemistry*. – 2019. – V. 76 (1). – P. 73–88. URL: <https://doi.org/10.1007/s10874-019-09388-z> (дата обращения 03.05.2022).
30. Particulate matter ionic and elemental composition during the winter season: a comparative study among rural, urban and remote sites in Southern Italy / E. Chianese, G. Tirimberio, A. Dinoi, D. Cesari, D. Contini, P. Bonasoni, A. Marinoni, V. Andreoli, V. Mannarino, S. Moretti, A. Naccarato, F. Sprovieri, I. Ammoscato, C.R. Calidonna, D. Gulli, A. Riccio // *Atmosphere*. – 2022. – 13 (2). – 356. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos13020356> (дата обращения 03.05.2022).
31. Elemental composition of fine and coarse particles across the greater Los Angeles area: spatial variation and contributing sources / F. Oroumijeh, M. Jerrett, I. Del Rosario, J. Lipsitt, J. Liu, S.E. Paulson, B. Ritz, J.J. Schauer, M.M. Shafer, J. Shen, S. Weichenthal, S. Banerjee, Y. Zhu // *Environmental Pollution*. – 2022. – V. 292. – 118356. URL: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118356> (дата обращения 03.05.2022).
32. Particulate matter geochemistry of a highly industrialized region in the Caribbean: Basis for future toxicological studies / L.F.O. Silva, I.L. Schneider, P. Artaxo, Y. Núñez-Blanco, D. Pinto, É.M.M. Flores, L. Gómez-Plata, O. Ramírez, G.L. Dotto // *Geoscience Frontiers*. – 2022. – V. 13 (1). – 101115. URL: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.012> (дата обращения 03.05.2022).
33. Quantification and characterization of metals in ultrafine road dust particles / S. Beauchemin, C. Levesque, C.L.S. Wiseman, P.E. Rasmussen // *Atmosphere*. – 2021. – V. 12 (12). – 1564. URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12121564> (дата обращения 03.05.2022).
34. Morantes G., González J.C., Rincón G. Characterisation of particulate matter and identification of emission sources in Greater Caracas, Venezuela // *Air Quality, Atmosphere and Health*. – 2021. – 14 (12). – P. 1989–2014. URL: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01070-2> (дата обращения 03.05.2022).
35. ГН 70. Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах, на территориях промышленных организаций от 02 августа 2022 года № 70. – Астана: Адилет, 2022. – 247 с. <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/history> (дата обращения 25.08.2022).
36. Техническая справка о результатах работ по этапу 04.01.01: «Выбор и обоснование методов определения искусственных (естественных) радионуклидов и химических токсикантов в воздушной среде на примере загрязненных территорий» тема 04.01 «Разработка методологии комплексной оценки состояния воздушного бассейна в зоне влияния объектов ЯТЦ». Научно-техническая программа «Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан». – Курчатов: МРНТИ 58.01.94; 87.17.81, 2021. – 43 с.
37. ГН 71. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности» от 02 августа 2022 года № 71. – Астана: Адилет, 2022. – 149 с. URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010671/history> (дата обращения 25.08.2022).
38. Report E88189 «Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution» / M. Amann, R. Derwent, B. Forsberg, F. Hurley, M. Krzyzanowski, B. Kuna-Dibbert, S. Larssen,



- F. de Leeuw, S. J. Liu, J. Schneider, P.E. Schwarze, D. Simpson, J. Stedman, P. Straehl, L. Tarrasón, L. van Bree // European Centre for Environment and Health Bonn Office Joint WHO. Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution. – 2006. – 113 p. URL: [https://www.euro.who.int/\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0006/78657/E88189.pdf](https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf) (дата обращения 03.05.2022).
39. Królak E., Karwowska J. Potassium-40 and Cesium-137 in the surface layers of arable soils and food supplies // Polish J. of Environ. Stud. – 2010. – V. 19 (3). – P. 599–604. URL: <http://www.pjoes.com/Potassium-40-and-Cesium-137-in-the-Surface-layers-of-Arable-Soils-and-Food-Supplies,88424,0,2.html> (дата обращения 03.05.2022).
40. Natural radioactivity in soils of the province of Cáceres (Spain) / A. Baeza, M. del Rio, C. Miro, J.M. Paniagua // Radiation Protection Dosimetry. – 1992. – V. 45 (1/4). – P. 261–263. URL: <https://doi.org/10.1093/tpd/45.1-4.261> (дата обращения 03.05.2022).
41. Миграция радиоактивных элементов в медоносных растениях, культивируемых в северном и западном районах Самарской области / В.С. Григорьев, С.И. Чучалов, Р.И. Александров, Е.П. Алексеев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2019. – № 4 (56). – С. 1–7. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-3
42. Radioactivity of soils in Mtskheta-Mtianeti region (Georgia) / N. Kekelidze, T. Jakhutashvili, B. Tutberidze, E. Tulashvili, M. Akhalkatsishvili, L. Mtsariashvili // Annals of Agrarian Sciences. – 2017. – V. 15 (3). – P. 304–311. DOI: 10.1016/j.aasci.2017.07.003
43. Pb-210 in rock and soils of the Semi-Arid Agreste Region of Pernambuco, Brazil / C.M. Silva, R.S. Amaral, J.N. Tabosa, J.A. Santos Júnior, R.S.C. Menezes, E.E.G. Farias, J.D. Bezerra, R.G. Silvestre, G.F. Oliveira // Bull. Environ. Contam. Toxicol. – 2009. – V. 82. – P. 647–649. DOI: 10.1007/s00128-009-9669
44. Сезонная динамика содержания химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха малых населенных пунктов, расположенных в зоне влияния «Восточного» следа радиоактивных выпадений Семипалатинского испытательного полигона / А.Е. Темиржанова, Е.Г. Язиков, М.Т. Дюсембаева, Е.З. Шакинов, Н.Ж. Мухамедияров, А.Ж. Ташекова, Г.М. Есильканов, В.В. Колбин, М.А. Умаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 12. – С. 189–199. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3346>

Поступила 15.06.2022 г.

#### Информация об авторах

**Темиржанова А.Е.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Язиков Е.Г.**, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Мухамедияров Н.Ж.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Сальменбаев С.Е.**, начальник группы исследований высокоактивных образцов Лаборатории радиохимических исследований Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Умаров М.А.**, заместитель директора Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Есильканов Г.М.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

**Ташекова А.Ж.**, инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

UDC 539.16:546:551.510.7:502(574.41)

## ASSESSMENT OF CHEMICAL ELEMENT CONTENT IN THE NATURAL ENVIRONMENT COMPONENTS OF THE «VOSTOCHNY» TRACE OF THE RADIOACTIVE FALLOUT AT THE SEMIPALATINSK TEST SITE

Arai Y. Temirzhanova<sup>1</sup>,  
temirzhanova.aray@mail.ru

Egor G. Yazikov<sup>2</sup>,  
yazikoveg@tpu.ru

Nurlan Zh. Mukhamediyarov<sup>1</sup>,  
mukhamediyarov@nnc.kz

Sayan E. Salmenbaev<sup>1</sup>,  
salmenbayev@nnc.kz

Murat A. Umarov<sup>1</sup>,  
Umarov@nnc.kz

Gani M. Yesilkanov<sup>1</sup>,  
yessilkanov@nnc.kz

Azhar Zh. Tashekova<sup>1</sup>,  
Esenzholova@nnc.kz

<sup>1</sup> National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan,  
2, Beibit Atom street, Kurchatov, 071100, Kazakhstan.

<sup>2</sup> National Tomsk Research Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**Relevance** of this work is attributed to the fact that no activities were carried out to assess the content of the chemical composition in environmental components including heavy metals and toxicants along the «Vostochny» fallout plume identified by the radioecological survey of areas adjacent to the Semipalatinsk Test Site. A concurrent survey of air aerosol particulate matter and soil composition at the «Opytnoe pole» site, at which atmospheric/aboveground-air nuclear tests were conducted, will provide a complete picture on potential sources of a radionuclide and chemical composition of environmental components formed in the «Vostochny» trace as well as of migration pathways of some elements and radionuclides incorporated in air aerosols. The survey of the north-eastern test site part, along the passing fallout trace, including settlements with agricultural activities, is especially topical to the population living there.

**The objective** of this paper is to evaluate accumulation levels of radionuclides and chemical elements in soil cover of the impact zone of the «Vostochny» trace at the Semipalatinsk Test Site as well as to reveal a possible input of certain chemical elements and radionuclides from the Semipalatinsk Test Site territory to adjacent areas along the «Vostochny» plume profile.

**Objects:** soil, air aerosol particulate matter.

**Techniques.** Samples were analyzed by alpha-, beta- and gamma-spectrometry, inductively coupled plasma mass-spectrometry, inductively coupled plasma atomic-emission spectrometry, by radiochemistry and scanning electronic microscopy; statistical processing of analytical results on the main environmental components of interest; assessment of the dynamics of spatial distribution of the content of radionuclides and chemical elements in samples of soil and air aerosol particulate matter in the study area.

**Results.** Chemical compositions (radionuclide and elemental) of soil cover in the profile of the «Vostochny» trace and 2.5 µm air aerosol particulate matter and total suspended particles, collected from areas located close to boundaries of the Semipalatinsk Test Site «Opytnoe pole» site, were studied. A spatial distribution of concentrations of chemical element groups under study and radionuclides in soil cover was identified in the «Vostochny» fallout trace. The correlation analysis of the content of elements in air samples allowed identification of associations of elements being characteristic of both fine particles (PM-2.5) and total suspended air particles at the Semipalatinsk Test Site «Opytnoe pole» testing site. The content of almost all chemical elements of interest incorporated in air aerosol particulate matter does not exceed permissible levels – maximum permissible concentrations.

### Key words:

Soil, air aerosol particulate matter, surface air, chemical elements, radionuclides, transfer by wind.

The work was partly done under the scientific and technical program «Development of atomic energy in the Republic of Kazakhstan» (ARN BR09158470), subject 04.01 «Development of a methodology on the comprehensive assessment of the air basin conditions in the impact zone of NFC facilities» (2021–2023) in cooperation with the staff of IRSE RSE NNC RK.

### REFERENCES

1. Kadyrzhanov K.K., Khazhekber S., Kazachevskiy I.V., Solodukhin V.P., Lukashenko S.N. Features of composition, its revealed forms and allocation at different STS platforms. *NNC RK Bulletin. Radioecology and environment protection*, 2000, no. 3, pp. 15–22. In Rus.
2. Akchurin I.A. *Semipalatinskiy yaderny poligon. Sozdanie stanovleniye, deyatelnost* [Semipalatinsk nuclear test site. Creation, formation, activity]. Moscow, Golden-Bi Publ., 2007. 258 p.
3. Logachev V.A. Nuclear tests at Semipalatinsk test site and their environmental impact. *NNC RK Bulletin. Radioecology and environment protection*, 2000, no. 3, pp. 9–14. In Rus.
4. Umarov M.A., Artem'yev O.I. Radioactive fallout due to atmospheric nuclear tests. *NNC RK Bulletin. Radioecology and environment protection*, 2001, no 3, pp. 20–25. In Rus.
5. Lukashenko S.N. *Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana* [Topical issues of radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom pechati Publ., 2015. Iss. 5, 356 p.
6. Andryushin I.A., Voloshin N.P., Ilkayev R.I., Matushchenko A.M., Mikhaylov V.N., Chernyshev A.K. *Yadernye ispytaniya SSSR. Gidroyadernye eksperimenty. Inventarizatsiya zatrat plutoniya* [Nuclear Tests of the USSR. hydronuclear experiments. Inventory of plutonium costs]. *Inf. byull. TSNIIatominform*, 1998, no. 12, pp. 60–63.
7. Logachev V.A. Vliyaniya yadernykh ispytaniy na Semipalatinskopoligone na sostoyaniye zdorov'ya naseleniya Kemerovskopoligona. *Inf. byull. TSNIIatominform*, 1998, no. 12, pp. 60–63.

- skoy i Novosibirskoy oblastey [Influence of nuclear tests at the Semipalatinsk test site on the state of health of the population of the Kemerovo and Novosibirsk regions]. *Byulleten tsentra obshchestvennoy informatsii po atomnoy energii*, 1996, Special Issue (March), pp. 9–15.
8. Artem'yev O.I., Osintsev A.Yu., Gaziyeu Ya.I., Kryshev I.I., Gordeyev S.K., Gaziyeu I.Ya., Kryshev A.I., Kolesnikova L.V., Ogorodnikov B.I., Martynenko V.P., Uvarov A.D. Integrated study of radioactive contamination of «atmosphere-geological substate» system and radiation risk assessment for population of Semipalatinsk region. *NNC RK Bulletin*, 2007, no 4, pp. 44–52. In Rus.
9. Chen L., Zhang J., Huang X., Li H., Dong G., Wei S. Characteristics and pollution formation mechanism of atmospheric fine particles in the megacity of Chengdu, China. *Atmospheric Research*, 2022, vol. 273, 106172. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106172> (accessed 3 May 2022).
10. Zhang D., Li Z., Wu H., Wu T., Ren R., Cai Z., Liang C., Chen L. Analysis of aerosol particle number size distribution and source attribution at three megacities in China. *Atmospheric Environment*, 2022, vol. 279, 119114. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119114> (accessed 3 May 2022).
11. Meng F., Wang J., Li T., Fang C. Pollution characteristics, transport pathways, and potential source regions of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Changchun city in 2018. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, vol. 17 (18), 6585. Available at: <https://doi.org/10.3390/ijerph17186585> (accessed 3 May 2022).
12. Cho J.-H., Kim H.-S., Yoon M.-B. The influence of atmospheric blocking on regional PM<sub>10</sub> aerosol transport to South Korea during February–March of 2019. *Atmospheric Environment*, 2022, vol. 277, 119056. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119056> (accessed 3 May 2022).
13. Furu E., Angyal A., Szoboszlai Z., Papp E., Török Z., Kertész Z. Characterization of aerosol pollution in two Hungarian cities in winter 2009–2010. *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (4), 554. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13040554> (accessed 3 May 2022).
14. Gubanova D.P., Vinogradova A.A., Iordanskii M.A., Skorokhod A.I. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020–2021: episodes of extreme air pollution of different genesis. *Atmosphere*, 2022, vol. 13 (4), 574. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13040574> (accessed 3 May 2022).
15. Xiong J., Tianliang Z., Yongqing B., Yu L., Yongxiang H., Chunwei G. Climate characteristics of dust aerosol and its transport in major global dust source regions. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, vol. 209, 105415. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105415> (accessed 3 May 2022).
16. Popovicheva O., Padoan S., Schnelle-Kreis J., Nguyen D.L., Adam T., Kistler M., Steinkogler T., Kasper-Giebl A., Zimmermann R., Chubarova N. Spring Aerosol in urban atmosphere of megacity: analytical and statistical assessment for source impacts. *Aerosol and Air Quality Research*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 702–719. Available at: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2019.08.0412> (accessed 3 May 2022).
17. Duc H.N., Chang L.T.C., Azzi M., Ningbo J. Smoke aerosols dispersion and transport from the 2013 New South Wales (Australia) bushfires. *Environmental monitoring and assessment*, 2018, vol. 190, no. 7, 428. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6810-4> (accessed 3 May 2022).
18. Guedes A.G., Landulfo E., Montilla-Rosero E., Lopes F.J.S., Hoelzemann J.J., Fernandez J.H., Silva M.P.A., Santos R.S.S., Guerrero-Rascado J.L., Alados-Arboledas L. Detection of Saharan mineral dust aerosol transport over Brazilian northeast through a depolarization lidar. *EPJ Web of Conferences. EDP Sciences*, 2018, vol. 176, 05036. Available at: <https://doi.org/10.1051/epjconf/201817605036> (accessed 3 May 2022).
19. Van Der Does M., Knippertz P., Zschenderlein P., Harrison R.G., Stuu J.-B.W. The mysterious long-range transport of giant mineral dust particles. *Science advances*, 2018, vol. 4, no. 12, eaau2768 DOI: 10.1126/sciadv.aau2768
20. Gubanova D.P., Elansky N.F., Skorokhod A.I., Kuderina T.M., Iordanskii M.A., Sadovskaya N.V., Anikin P.P. Physical and chemical properties of atmospheric aerosols in Moscow and its suburb for climate assessments. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2020, vol. 606, no. 1, 012019. Available at: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/606/1/012019> (accessed 3 May 2022).
21. Gubanova D.P., Iordanskii M.A., Kuderina T.M., Skorokhod A.I., Elansky N.F., Minashkin V.M. Elemental composition of aerosols in the near-surface air of Moscow: seasonal changes in 2019 and 2020. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2021, vol. 34, no. 5, pp. 475–482. DOI: 10.1134/S1024856021050122
22. Klopfer D., Formenti P., Namwoonde A., Cazaunau M., Chevaillier S., Feron A., Gaimoz C., Hease P., Lahmidi F., Mirande-Bret C., Triquet S., Zeng Z., Piketh S.J. Chemical composition and source apportionment of atmospheric aerosols on the Namibian coast. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, vol. 20, no. 24, pp. 15811–15833. Available at: <https://doi.org/10.5194/acp-20-15811-2020> (accessed 3 May 2022).
23. Volodina D.A., Talovskaya A.V., Devyatova A.Y., Edelev A.V., Yazikov E.G. Elemental composition of dust aerosols near cement plants based on the study of samples of the solid phase of the snow cover. *Pure and Applied Chemistry*, 2022, 94 (3), pp. 269–274. Available at: <https://doi.org/10.1515/pac-2021-0315> (accessed 3 May 2022).
24. Buchelnikov V.S., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Simonenkov D.V., Belan B.D., Tentyukov M.P. Analysis of the content of chemical elements in aerosols using data from passive sampling at Fonovaya observatory. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2020, 33 (5), pp. 490–495. DOI: 10.1134/S1024856020050061
25. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C., Kim J., Shakhova T.S. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology (United Kingdom)*, 2018, 39 (18), pp. 2288–2303. DOI: 10.1080/09593330.2017.1354075
26. Gaberšek M., Watts M.J., Gosar M. Attic dust: an archive of historical air contamination of the urban environment and potential hazard to health? *Journal of Hazardous Materials*, 2022, vol. 432, 128745. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128745> (accessed 3 May 2022).
27. Vlasov D., Kasimov N., Eremina I., Shinkareva G., Chubarova N. Partitioning and solubilities of metals and metalloids in spring rains in Moscow megacity. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, vol. 12 (1), pp. 255–271. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.012> (accessed 3 May 2022).
28. Ukraintsev A.V., Plyusnin A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 122, 104723. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104723> (accessed 3 May 2022).
29. Zhang X., Zhao X., Ji G., Ying R., Shan Y., Lin Y. Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in Nanjing, a megacity in southeastern China. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2019, vol. 76 (1), pp. 73–88. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10874-019-09388-z> (accessed 3 May 2022).
30. Chianese E., Tirimerio G., Dinio A., Cesari D., Contini D., Bonasoni P., Marinoni A., Andreoli V., Mannarino V., Moretti S., Naccarato A., Sprovieri F., Ammoscato I., Calidonna C.R., Gulli D., Riccio A. Particulate matter ionic and elemental composition during the winter season: a comparative study among rural, urban and remote sites in Southern Italy. *Atmosphere*, 2022, 13 (2), 356. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos13020356> (accessed 3 May 2022).
31. Oroumijeh F., Jerrett M., Del Rosario I., Lipsitt J., Liu J., Paulson S.E., Ritz B., Schauer J.J., Shafer M.M., Shen J., Weichenthal S., Banerjee S., Zhu Y. Elemental composition of fine and coarse particles across the greater Los Angeles area: Spatial variation and contributing sources. *Environmental Pollution*, 2022, vol. 292, 118356 Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118356> (accessed 3 May 2022).
32. Silva L.F.O., Schneider I.L., Artaxo P., Núñez-Blanco Y., Pinto D., Flores É.M.M., Gómez-Plata L., Ramírez O., Dotto G.L. Particulate matter geochemistry of a highly industrialized region in the Caribbean: Basis for future toxicological studies. *Geoscience Frontiers*, 2022, vol. 13 (1), 101115. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.012> (accessed 3 May 2022).
33. Beauchemin S., Levesque C., Wiseman C.L.S., Rasmussen P.E. Quantification and Characterization of Metals in Ultrafine Road Dust Particles. *Atmosphere*, 2021, vol. 12 (12), 1564. Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12121564> (accessed 3 May 2022).



34. Morantes G., González J.C., Rincón G. Characterisation of particulate matter and identification of emission sources in Greater Caracas, Venezuela. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2021, 14 (12), pp. 1989–2014. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-021-01070-2> (accessed 3 May 2022).
35. GN 70. *Gigienicheskie normativy k atmosfernomu vozdukhu v gorodskikh i selskikh naselennykh punktakh, na territoriyakh promyshlennykh organizatsiy ot 02 avgusta 2022 goda № 70* [Hygienic standards for atmospheric air in urban and rural settlements, on the territories of industrial organizations dated August 02, 2022 No. 70]. Astana, Adilet Publ., 2022. 247 p. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/history> (accessed 25 August 2022).
36. *Tekhnicheskaya spravka o rezultatakh rabot po etapu 04.01.01: «Vybor i obosnovanie metodov opredeleniya iskusstvennykh (estestvennykh) radionuklidov i khimicheskikh toksikantov v vozdukhnoy srede na primere zagryaznennykh territoriy» tema 04.01 «Razrabotka metodologii kompleksnoy otsenki sostoyaniya vozdukhnoy basseyna v zone vliyaniya obyektov YATTS»* [«Selection and justification of methods for determining artificial (natural) radionuclides and chemical toxicants in the air on the example of contaminated territories» topic 04.01 «Development of a methodology for a comprehensive assessment of the state of the air basin in the zone of influence of NFC facilities»]. Nauchno-tekhnicheskaya programma «Razvitiye atomnoy energetiki v Respublike Kazakhstan». Kurchatov, international rubricator of scientific and technical information 58.01.94; 87.17.81, 2021. 43 p.
37. GN 71. *Gigienicheskie normativy «Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti» ot 02 avgusta 2022 goda № 71* [Sanitary and epidemiological requirements for ensuring radiation safety]. Astana, Adilet Publ., 2022. 149 p. Available at: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500010671/history> (accessed 25 August 2022).
38. Amann M., Derwent R., Forsberg B., Hurley F., Krzyzanowski M., Kuna-Dibbert B., Larssen S., de Leeuw F., Liu S.J., Schneider J., Schwarze P.E., Simpson D., Stedman J., Straehl P., Tarrasón L., Van Bree L. Report E88189 «Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution». *European Centre for Environment and Health Bonn Office Joint WHO. Convention Task Force on the Health Aspects of Air Pollution*, 2006. 113 p. Available at: [https://www.euro.who.int/\\_data/assets/pdf\\_file/0006/78657/E88189.pdf](https://www.euro.who.int/_data/assets/pdf_file/0006/78657/E88189.pdf) (accessed 3 May 2022).
39. Królak E., Karwowska J. Potassium-40 and Cesium-137 in the Surface Layers of Arable Soils and Food Supplies. *Polish J. of Environ. Stud.*, 2010, vol. 19 (3), pp. 599–604. Available at: <http://www.pjoes.com/Potassium-40-and-Cesium-137-in-the-Surface-layers-of-Arable-Soils-and-Food-Supplies,88424,0,2.html> (accessed 3 May 2022).
40. Baeza A., Del Rio M., Miro C., Paniagua J.M. Natural radioactivity in soils of the province of Cáceres (Spain). *Radiation Protection Dosimetry*, 1992, vol. 45 (1/4), pp. 261–263. Available at: <https://doi.org/10.1093/rpd/45.1-4.261> (accessed 3 May 2022).
41. Grigoryev V.S., Chuchkalov S.I., Aleksandrov R.I., Alekseyev E.P. Migration of radioactive elements in honey plants cultivated in the northern and western regions of the Samara region. *Izvestia of the Lower Volga Agro-University Complex: Science and higher professional education*, 2019, vol. 4, no. 56, pp. 1–7. In Rus. DOI: 10.32786/2071-9485-2019-04-3.
42. Kekelidze N., Jakhutashvili T., Tutberidze B., Tulashvili E., Akhalkatsishvili M., Mtsariashvili L. Radioactivity of soils in Mtskheta-Mtianeti region (Georgia). *Annals of Agrarian Sciences*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 304–311. DOI: 10.1016/j.aasci.2017.07.003
43. Silva C.M., Amaral R.S., Tabosa J.N., Santos Júnior J.A., Menezes R.S.C., Farias E.E.G., Bezerra J.D., Silvestre R.G., Oliveira G.F. Pb-210 in Rock and Soils of the Semi-Arid Agreste Region of Pernambuco, Brazil. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, 2009, vol. 82, pp. 647–649. DOI: 10.1007/s00128-009-9669
44. Temirzhanova A.Ye., Yazikov E.G., Dyusembayeva M.T., Shakenov Ye.Z., Mukhamediyarov N.Zh., Tashekova A.Zh., Yesilkanov G.M., Kolbin V.V., Umarov M.A. Seasonal dynamics of the content of chemical elements in particulate aerosols in the air of small settlements located in the zone of influence of the «Vostochny» trace of radioactive fallout from the Semipalatinsk test site. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 12, pp. 189–199. In Rus. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/12/3346>

Received: 15 June 2022.

#### Information about the authors

**Arai Y. Temirzhanova**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Egor G. Yazikov**, Dr. Sc., professor, National Tomsk Research Polytechnic University.

**Nurlan Zh. Mukhamediyarov**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Sayan E. Salmenbaev**, head of High Level Samples Research Group, National Nuclear Centre of the Republic of Kazakhstan.

**Murat A. Umarov**, deputy director of the Institute of Radiation Safety and Ecology, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Gani M. Yesilkanov**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

**Azhar Zh. Tashekova**, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.