

УДК 551.510.721:502 (574.41)

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦАХ АЭРОЗОЛЕЙ ВОЗДУХА МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ «ВОСТОЧНОГО» СЛЕДА РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Темиржанова Арай Еркековна¹,
temirzhanova.aray@mail.ru

Язиков Егор Григорьевич²,
yazikoveg@tpu.ru

Дюсембаева Мадина Талгатовна¹,
koigeldinova@nnc.kz

Шакенов Ербол Зейнелгазинович¹,
shakenov@nnc.kz

Мухамедияров Нурлан Жумагазыевич¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

Ташекова Ажар Жумановна¹,
Esenzholova@nnc.kz

Есильканов Гани Мухтарович¹,
yessilkanov@nnc.kz

Колбин Владимир Валерьевич¹,
kolbin@nnc.kz

Умаров Мурат Алпыспаевич¹,
Umarov@nnc.kz

¹ Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
Казахстан, 071100, г. Курчатов, ул. Бейбит Атом, 2.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность данной работы обусловлена тем, что возникает вопрос о проведении исследований для выявления содержания химических элементов по одному из основных следов «Восточный» Семипалатинского испытательного полигона и прилегающих к нему территории, включая некоторые малые населенные пункты, посредством изучения твердых частиц аэрозолей воздуха. На примере сел Долонь, Бескарагай и Канонерка изучение элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха даст наиболее полную картину о качестве воздуха малых населенных пунктов со схожими климатическими условиями. Данные населенные пункты расположены в следе «Восточный», недалеко от условно обозначенных границ Семипалатинского испытательного полигона. Среди них особо актуальным вопросом является изучение качественного состава атмосферного воздуха непосредственно самого полигона и прилегающих к нему зон. Особый интерес среди них вызывает химический состав твердых частиц аэрозолей воздуха (PM-2,5 – Particulate matter – твердые частицы аэрозолей воздуха с диаметром менее 2,5 мкм, PM-10 – Particulate matter – твердые частицы аэрозолей воздуха с диаметром менее 10 мкм, TSP-Total suspended particles – Общие взвешенные частицы), содержащих радиоактивные элементы и тяжелые металлы. Взвешенные вещества размером менее 10 мкм распространяются на большие расстояния и являются потенциальными загрязнителями основных компонентов природы.

Цель: определить источники поступления химических элементов в атмосферу населенных пунктов, в зоне воздействия «Восточного» следа радиоактивных выпадений, прилегающей к территории Семипалатинского испытательного полигона, на примере сел Долонь, Бескарагай и Канонерка, а также оценить качество атмосферного воздуха.

Объекты: твердые частицы аэрозолей воздуха, почва.

Методы. Пробы проанализированы методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (МС-ИСП), атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) и сканирующей электронной микроскопии; проведены процедуры внутреннего контроля качества (сравнение результатов, полученных различными способами анализа); статистическая обработка результатов анализа основных исследуемых компонентов природной среды; сезонная динамика распределения содержания элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха исследуемых малых населенных пунктов.

Результаты. Изучен химический состав (элементный) твердых частиц аэрозолей воздуха размером 2,5 мкм, а также почвы малых населенных пунктов. Выявлена сезонная динамика распределения концентраций исследуемых групп химических элементов. Анализ сезонного изменения химического состава аэрозолей воздуха позволил выявить их источники поступления. Превышения ПДК среднесуточного содержания нормируемых химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха не обнаружено.

Ключевые слова:

Твердые частицы аэрозолей воздуха, почва, масс-спектрометр с индуктивно связанной плазмой, естественные радионуклиды, тяжелые металлы.

Введение

Оценка состояния воздуха населенных мест ограничивается, как правило, определением количества газообразных компонентов и разных фракций пылевых частиц. Содержание химических элементов, в

том числе тяжелых металлов, большинство которых поступают в атмосферный воздух в результате интенсивной антропогенной деятельности, начали изучать полноценно последние 10–20 лет [1–4]. На сегодняшний день существенный вклад в загрязнение атмо-

сферы населенных мест приносят твердые частицы аэрозолей воздуха размером менее 10 мкм, такие как пыль, сажа, зола, которые содержат различные химические элементы [5–9]. Под атмосферным аэрозолем понимают твердые или жидкие дисперсные частицы размером приблизительно от долей до сотен мкм, находящиеся в атмосфере во взвешенном состоянии. Аэрозоль легко проникает в органы человека в процессе дыхания и при наличии в них вредных веществ (тяжелые металлы и радионуклиды) может привести к тяжелым заболеваниям [10, 11]. Наряду с исследованием радиоэкологической обстановки малых населенных пунктов, прилегающих к северо-восточной части Семипалатинского испытательного полигона (СИП), проведены работы по определению элементного состава твердых частиц аэрозолей воздуха, включая содержание естественных радионуклидов.

На сегодняшний день химический состав компонентов природы «Восточного» следа мало изучен. Имеются данные только по содержанию радионуклидов в атмосферном воздухе прилегающих населенных пунктов. Так, по ранее проведенным исследованиям Института радиационной безопасности и экологии было выявлено, что в воздушной среде по профилю «Восточного» следа объемная активность искусственных радионуклидов показала значения на 2–3 порядка ниже установленных нормативов, в том числе и на территориях населенных пунктов Долонь, Бескарагай и Канонерка [12]. В связи с чем возникает вопрос о проведении исследований для выявления пространственного распределения содержания радионуклидов и химических элементов «Восточного» следа СИП и прилегающих к нему территорий, включая некоторые малые населенные пункты посредством изучения твердых частиц аэрозолей воздуха.

Малые населенные пункты (Долонь, Бескарагай, Канонерка) находятся в районе прохождения «Восточного» следа радиоактивных выпадений и расположены в непосредственной близости (30–70 км) от границ СИП. Данные села расположены в южной и юго-западных частях Бескарагайского района Восточно-Казахстанской области Республики Казахстан вдоль ленточного бора Иртышского бассейна. В настоящее время количество проживающих людей в трех исследуемых населенных пунктах в сумме составляет более 6000 человек. Около 80 % местного населения в зимний период для отопления домов сжигают древесину (сосна, осина), остальные 20 % – уголь с месторождения «Каражыра». Помимо индивидуальных печей на территории исследуемых малых населенных пунктов функционируют котельные.

Регулярные исследования позволят изучить динамику изменения концентрации химических элементов в воздухе с течением времени, а специальные уточняющие исследования будут использоваться для оценки масштабов распространения химических элементов воздушным путем за пределы испытательных площадок СИП.

Целью данной работы является изучение источников поступления химических элементов, включая естественные радионуклиды, в атмосферный воздух

малых населенных пунктов, прилегающих к СИП, а также оценить качество воздуха.

Объекты и методы исследования

Твердые частицы аэрозолей воздуха (PM-2.5). Среднесуточные пробы твердых частиц аэрозолей воздуха отбирали переносным пробоотборником воздуха MVS6, который оснащен впускным трактом, позволяющим отсекаать крупные частицы с размерами более 2,5 мкм, с фиксированной скоростью на стационарном посту мониторинга. Стационарный пост был расположен на ровном участке ландшафта вдали от строений, леса и других препятствий на высоте 1,5 м от поверхности земли с твердым не пылящим покрытием.

Отбор проб проводили с 2014 по 2016 гг. Согласно рекомендациям [13] было отобрано более 80 проб. Среднесуточный отбор проб твердых частиц аэрозолей воздуха производили с 8.00 утра до 8.00 утра следующего дня.

Почва. Со всей площади с. Долонь было отобрано 30 проб почвы. Масса каждой пробы почвы составила около 0,5 кг. Также была отобрана «фоновая» проба на расстоянии 1,2 км в северо-западном направлении от села.

Прободготовку твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы проводили способом автоклавного разложения, с использованием концентрированных фтористоводородной (HF) и азотной (HNO₃) кислот в соотношении 1:2. Автоклавы выдерживали в течение 4 ч. в сушильном шкафу, нагретом до температуры 160±5 °С. После охлаждения объем раствора доводили до 15 мл 7 М HNO₃.

В каждой партии фильтров для отбора твердых частиц аэрозолей воздуха анализировали содержание химических элементов в чистых неэкспонированных образцах.

Определение содержания химических элементов в составе твердых частиц аэрозолей воздуха и почвы проводили методами масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) с использованием квадрупольного масс-спектрометра Agilent 7700x «Agilent Technologies», а также атомно-эмиссионного спектрометра с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-АЭС) ICAP 6000 Duo «Thermo Scientific» на базе лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан. Спектрометры были откалиброваны с помощью сертифицированных мультиэлементных стандартных образцов производства компании «Perkin Elmer», США. Относительное стандартное отклонение (RSD) измерений было меньше 10 %. Контроль качества измерений 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.

Также с применением растровой сканирующей электронной микроскопии на микроскопе Hitachi S-3400N с ЭДС приставкой Bruker XFlash 4010 были изучены более 10 проб воздушных аэрозолей и 5 проб почвы на базе МИНОЦ «Урановая геология» НИ ТПУ.

Таблица 1. Содержание элементов в стандартном образце (CRM-027-050), мг/кг (n=9)

Table 1. Content of elements in a standard sample (CRM-027-050), mg/kg (n=9)

Элементы Elements	Содержание элементов Content of elements	Аттестованное значение (доверительный прогнозный интервал) Certified value (confidence/ prediction limit)	Отклонение значения суммы от атт. значения, % Deviation of a value from the sum of certified val., %
Be	2,95±0,40	2,73±0,102 (2,59–2,86/2,09–3,37)	8,1
Cr	22±3	(26,9±1,68) (24,8–29,1/16,4–37,5)	–18,2
Mn	275±38	259±7,38 (250–268/212–305)	6,2
Fe	10100±1400	11200±497 (10500–11900/8000–14300)	–9,8
Co	4,5±0,6	4,7±0,271 (4,34–5,06/2,99–6,41)	–4,3
Ni	11,6±1,6	10,5±0,704 (9,6–11,5/6,11–15)	10,5
Cu	10,6±1,3	9,87±0,5 (9,16–10,6/6,75–13)	7,4
Zn	46,8±6,4	51,3±2,63 (47,7–55/34,8–67,9)	–8,8
As	10,0±1,4	12,4±0,948 (11–13,7/6,37–18,3)	19,4
Mo	0,8±0,1	–	–
Cd	11,8±1,6	12±0,589 (11,2–12,8/8,31–15,7)	–1,7
La	20,0 ±2,8	–	–
Ce	42 ±6	–	–
Pr	4,8±0,7	–	–
Nd	20,0±2,8	–	–
Sm	3,4±0,6	–	–
Pb	50,1±6,9	51,9±2,46 (48,7–55,1/36,4–67,4)	–3,5
Th	3,10±0,40	–	–

Анализ проб проводили на определение естественных радионуклидов – ^{232}Th , ^{238}U , а также следующих элементов: Be, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Mo, Cd, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Pb, по методике ISO 17294-2:2003 (E) с номером государственной регистрации 022/10505 от 27.12.2005 г. [14]. Данные по контролю качества и обеспечению качества элементного анализа приведены в табл. 1.

Расчет основных экологических параметров:

Определение запыленности (массовой концентрации пыли) воздуха производили путем расчета (1):

$$C_3 = M/V \times 1000, \quad (1)$$

где C_3 – коэффициент запыленности, мг/м³; M – масса пыли, г; V – объем прокаченного воздуха, м³.

Обсуждение результатов

Твердые частицы аэрозолей воздуха (PM-2,5). Ранее проведенные единичные исследования по определению содержания некоторых тяжелых металлов и попутных элементов в пылеаэрозольных выпадениях

прилегающих территорий выявили значимые их содержания. Так, к примеру, были определены высокие концентрации тяжелых металлов (мышьяк, кадмий, медь) относительно среднего содержания в земной коре в пылеаэрозольных выпадениях, а именно в нерастворимой фазе снегового покрова [15]. Мониторинговые исследования, проводимые с 2014 по 2016 гг. в рамках научно-технической программы Республики Казахстан «Комплексное радиоэкологическое исследование населенных пунктов Большая Владимирка и Канонерка и прилегающих территорий (40 км²)» по разделу «Оценка загрязнения тяжелыми металлами атмосферного воздуха» выявили следующие данные по содержанию некоторых групп химических элементов, представленные в табл. 2.

В данной таблице представлены результаты сезонных колебаний содержания исследуемых групп элементов в трех населенных пунктах, расположенных в зоне выпадения радиоактивных осадков. Динамика содержания элементов в PM-2,5 в исследуемых населенных пунктах имеет разный характер распределения по сезонам. Рассмотрим каждый населенный пункт по отдельности.

Для населенного пункта Бескарагай выделены группы элементов, характерных для каждого сезона. Так, в отопительный сезон в уловленных образцах пыли наблюдаются повышенные значения концентрации таких элементов, как Be, Cu, As, Mo, La, Ce, Pr, Nd, Th, относительно их содержания в неотопительный период. В зимний период основным источником поступления этих элементов в атмосферный воздух малого населенного пункта Бескарагай является процесс сжигания твердого топлива (уголь месторождения Каражыра), поскольку в ранее проведенных исследованиях [15] в зольных остатках угля были выявлены их высокие содержания. В атмосферном воздухе данного населенного пункта в течение всего года наблюдается стабильность в динамике распределения содержания остальной группы элементов (Fe, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Sm, Cd, Pb) как основных элементов-примесей, постоянно присутствующих в воздушной массе. Возможно, что источниками данной группы элементов выступает почвенно-эрозионный процесс летом, а в отопительный сезон – процесс сжигания угля.

Как видно из представленных данных, в населенном пункте Канонерка в неотопительный период содержание Mn имеет низкое значение по отношению к его концентрации в PM-2,5, отобранных в двух других селах. Возможно, что такого рода поведение данного элемента связано с локальными метеорологическими условиями и рельефом местности (наличие безветренной погоды за время экспозиции образцов). Наблюдается стабильная динамика распределения концентрации молибдена в твердых частицах аэрозолей воздуха, отмечены одинаковые максимальные содержания и за неотопительный, и за отопительный периоды, 35 и 27 нг/м³ соответственно. Также можно отметить концентрацию меди, непрерывно поступающей в атмосферный воздух независимо от сезонов, однако максимальные пики её накопления характер-

ны для зимнего периода. Так, к примеру, летний максимум его составляет 70 нг/м^3 , зимний – 310 нг/м^3 .

Данного рода сезонное колебание содержания меди связано с процессом сжигания топлива.

Таблица 2. Сезонная динамика содержания элементов в образцах РМ-2,5 в исследуемых населенных пунктах, $n=33$
Table 2. Seasonal dynamics of the content of elements in РМ-2,5 samples in settlements of interest, $n=33$

Элементы Elements	Неотопительный сезон, нг/м^3 Non-heating season, ng/m^3			Отопительный сезон, нг/м^3 Heating season, ng/m^3		
	Бескарагай Beskaragay	Канонерка Kanonerka	Долонь Dolon	Бескарагай Beskaragay	Канонерка Kanonerka	Долонь Dolon
Be	<0,01	<0,01	<0,01	0,20 0,09–0,30	0,20 0,10–0,40	<0,01
Cr	17 17–17	<0,5	23,0 3,2–30,0	17,0 0,5–28,0	30 0,5–40	<0,5
Mn	13 6–34	5,5 0,5–30,0	63 12–170	46 20–88	17,0 5,0–41	<0,5
Fe	1400 790–2100	1300 620–1500	1700 25–2800	750 290–1500	140 25–620	<25
Co	2,0 2,0–2,0	<0,03	<0,03	1,00 0,03–2,10	2,00 0,03–4,00	0,15 0,03–0,90
Ni	9,5 8,0–11,0	<0,1	3,6 0,1–7,5	5,0 0,1–20,0	12,0 1,5–71,0	4,2 0,1–12,5
Cu	9,5 7,0–12,0	38 12–70	140,0 80–260	46 32–550	97 47–310	210 160–290
Zn	7000 7000–7000	<25	5000 25–7400	6900 3800–11000	11000 2500–15000	10600 5200–20800
As	<0,5	17,0 0,5–27,0	34,0 2,3–80,0	3,0 0,5–4,3	4,0 0,5–23,0	44 3–230
Mo	<0,5	6,3 0,9–35,0	17 3–34	9,0 0,5–91,0	12,0 8,5–27,0	13 3–50
Cd	2,5 2,0–3,0	<0,1	<0,1	1,0 0,2–2,0	2,0 0,6–3,0	1,3 0,2–3,8
La	<0,02	0,20 0,05–1,70	11 7–16	8,70 0,05–18,00	20,0 0,4–27,0	<0,02
Ce	<0,3	<0,3	15,0 1,7–24,0	6,4 1,0–24,0	26,0 0,5–33,0	2,2 0,1–15,0
Pr	<0,05	<0,05	2,4 1,4–3,7	2,00 0,05–4,00	5,00 0,05–5,00	<0,05
Nd	<0,03	<0,03	9,5 5,3–13,0	5,3 0,3–12,0	15,0 0,4–18,0	<0,03
Sm	4,5 3,0–6,0	<0,04	1,3 0,7–2,3	9,2 3,0–16,0	22 7–26	<0,04
Pb	10,5 9,0–12,0	<0,5	14,0 0,5–15,0	12 11–40	21 15–30	31 2–40
Th	<0,05	<0,05	1,5 1,0–5,0	1,30 0,05–4,0	4,00 0,05–6,00	<0,05
U	<0,05	0,10 0,05–0,10	1,0 0,05–3,0	0,7 0,4–2,0	1,0 0,4–1,0	1,0 0,05–1,0

Из группы редкоземельных элементов (РЗЭ) в неотопительный период незначительные содержания были отмечены у лантана, с максимальным значением $1,7 \text{ нг/м}^3$. Содержание остальной группы РЗЭ в отобранных образцах мелкодисперсной пыли данного населенного пункта составило меньше предела обнаружения прибора.

Одной из основных задач данной работы было исследование, направленное на непрерывное наблюдение в течение 2 лет за динамикой содержания изучаемых групп химических элементов в пылевых частицах аэрозолей воздуха населенного пункта, наиболее близко расположенного к границам СИП. Данным населенным пунктом является Долонь, где за исследуемый период была отобрана 51 проба твердых частиц аэрозолей воздуха.

Анализ полученных данных показал, что в пробах воздушных аэрозолей села Долонь превышения предельно допустимой концентрации среднесуточного содержания исследуемых групп химических элемен-

тов не обнаружено [16]. Следует отметить, что содержание такого нормируемого компонента, как Be, в твердых частицах аэрозолей воздуха показало значение меньше предела обнаружения прибора.

В твердых частицах аэрозолей воздуха данного населенного пункта по значениям концентрации можно выделить группы элементов, характерных для определенных сезонов. Так, в летний период в составе твердых частиц аэрозолей воздуха РМ-2,5 были обнаружены относительно высокие концентрации Cr, Mn, Fe, Th и некоторых РЗЭ – La, Pr, Nd, Sm, относительно их содержания в составе аэрозолей в отопительный сезон. В зимний период отмечена относительно высокая концентрация Co и Cd в составе РМ-2,5 в сравнении с их содержанием в летний период. Также выявлена группа элементов с относительно стабильным распределением содержания в составе твердых частиц аэрозолей воздуха за весь исследуемый период. Так, к данной группе относятся такие элементы, как Ni, Cu, As, Mo, U.

Содержание Pb в твердых частицах аэрозолей воздуха также зависит от почвенно-эрозионных процессов, о чем свидетельствует его высокая концентрация в неотапливаемый сезон. Концентрация свинца была стабильно высокой в неотапливаемый период за исключением июня месяца. Среднемесячное содержание свинца в аэрозолях воздуха в летний сезон варьировало от 11 до 15 нг/м³.

Одним из элементов, поступление которого в твердые частицы аэрозолей воздуха обусловлено выветриванием из почвенного покрова, является Fe [17]. В летний период, когда подстилающая поверхность почвы открыта, наблюдается высокое содержание данного элемента в уловленных частицах пыли. По динамике его содержания можно предположить, что в сентябре поступление в малых количествах обусловлено местными климатическими условиями (выпадение осадков).

Ниже представлены графики сезонной динамики распределения концентрации Mn, Cr, Nd, Pr, Sm, La, Ce в 51 пробе воздушных аэрозолей, отобранных с основного поста в с. Долонь (рис. 1, а–в).

Как видно из графика, наблюдается четкая сезонная динамика распределения концентрации вышеуказанных химических элементов. В неотапливаемый сезон в твердых частицах аэрозолей, содержащихся в приземном слое атмосферы с. Долонь, определено содержание Cr, Mn а также редкоземельных элементов в относительно больших концентрациях, чем в отопительный сезон. Максимальный пик динамики распределения среднего содержания хрома и марганца приходится на июнь месяц. В данный период времени среднее содержание хрома составило 30 нг/м³, а Mn – 150 нг/м³. Идентичным характером распределения за неотапливаемый период обладают концентрации празеодима, неодима и самария. Средние значения (за среднее взяты медианные показатели) за июнь месяц содержаний элементов составили: Pr – 3,7 нг/м³, Nd – 13 нг/м³ и Sm – 0,7 нг/м³. Данная стабильная динамика распределения концентраций хрома, марганца, празеодима, неодима и самария свидетельствует об их природном источнике поступления, а именно о почвенно-эрозионном процессе.

Следует отметить специфическое поведение содержания Ce в исследуемых образцах твердых частиц аэрозолей воздуха. Концентрация данного элемента весьма нестабильна в течение года. Отмечены пики возрастания содержания церия в июне, августе и октябре, когда его концентрация составила от 10 до 25 нг/м³, тогда как в остальные месяцы – менее 10 нг/м³. Такого рода сложное поведение содержания церия в аэрозолях воздуха за исследуемый период (1 год), возможно, связано с несколькими основными источниками поступления. Содержание легких лантаноидов в природе больше, чем тяжелых, в то же время церия в природе больше, чем лантана [18]. Во всех месяцах, за исключением апреля, наблюдается природное соотношение содержания лантана к церию. В данный отрезок времени (апрель) содержание лантана преобладает над концентрацией церия в 8 раз. Для выяснения причин такого аномального поведения

содержания лантана необходимы дополнительные исследования. Согласно литературным данным [18] в углях в качестве примеси содержатся редкоземельные элементы, которые могут поступать в атмосферный воздух при сжигании угля, т. е. возможным источником поступления церия в зимний период на исследуемой территории может быть процесс сжигания твердого топлива. В исследуемых нами образцах угля содержание церия составило около 20 мг/кг, в золе – 58 мг/кг.

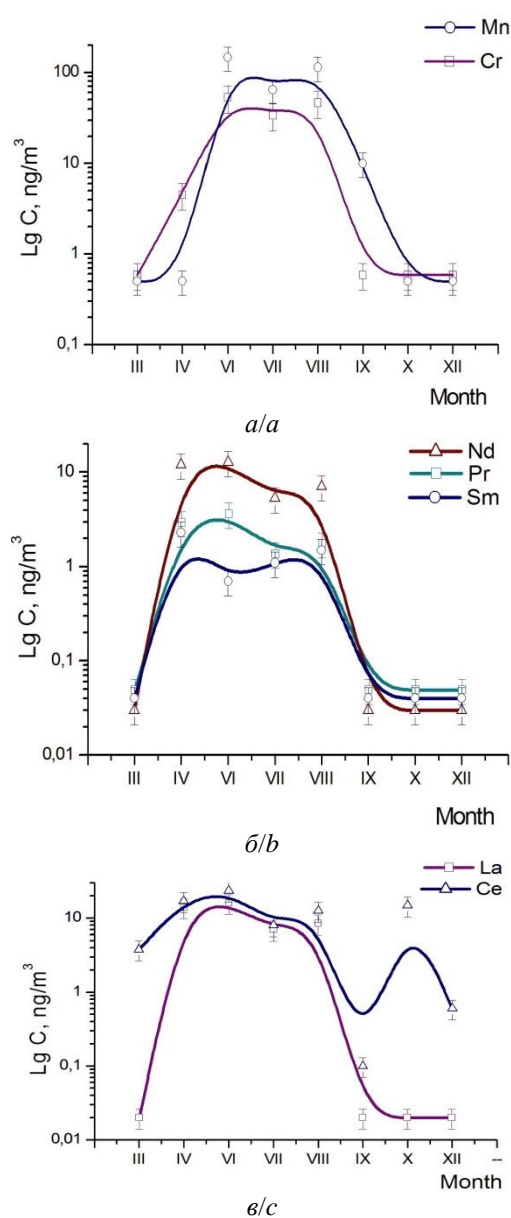


Рис. 1. Сезонная динамика концентрации PM-2,5 Mn, Cr (А), Nd, Pr, Sm (Б), La, Ce (В)

Fig. 1. Seasonal dynamics of concentration of PM-2,5 of Mn, Cr (A), Nd, Pr, Sm (B), La, Ce (B)

Динамика распределения концентраций Co и Cd имеет нестабильный характер в течение года. Содержание Co и Cd в твердых частицах аэрозолей воздуха в отопительный период была стабильно высокой. В зимние месяцы отопительного периода в составе

твердых частиц аэрозолей воздуха были обнаружены их относительно высокие содержания – 0,9 и 3,8 нг/м³ соответственно. Вероятно, это свидетельствует об их постоянном источнике поступления, т. е. процессе сжигания твердого топлива [19–21].

Также выявлена группа элементов с более стабильной динамикой распределения содержания за исследуемый период. Отмечен относительно более стабильный характер распределения концентрации Ni, Cu, As, Mo, U. На рис. 2 представлена сезонная динамика распределения содержания Ni и Cu. Резкое понижение концентрации никеля отмечается в июне и декабре. В остальной период времени содержание данного элемента в твердых частицах аэрозолей воздуха варьирует в пределах от 0,8 до 13 нг/м³.

Определена схожая картина распределения среднесуточных концентраций меди и никеля по некоторым месяцам отопительного и неотопительного сезонов. Разница между средними значениями концентрации за отопительный и неотопительный сезоны по никелю составляет 1,3 раза, по меди – 1,4 раза. Однако следует отметить, что пики понижения концентраций никеля в апреле, мае и декабре имеют более четкий характер, в сравнении с понижением содержания меди в этих месяцах. Стабильность динамики распределения содержания данных элементов независимо от периодов свидетельствует об их природном источнике поступления в атмосферный воздух исследуемой территории.

Ниже представлены результаты анализа, полученные с применением растрового сканирующего электронного микроскопа (рис. 3, а–в). В большинстве анализируемых образцов наблюдалось наличие частиц меди в РМ-2,5. Также следует отметить, что в образцах почвы (0–5 см) были выявлены частицы минералов с содержанием редкоземельных элементов.

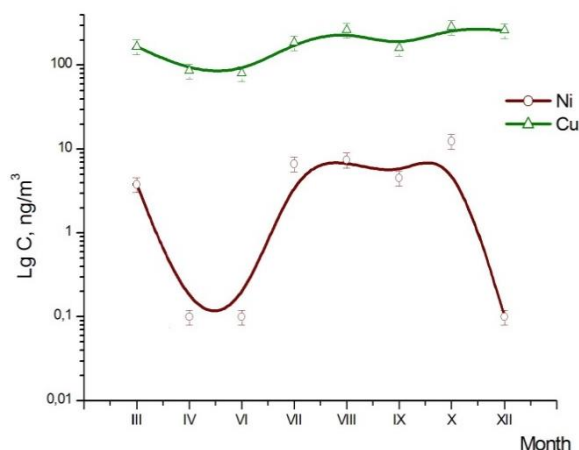


Рис. 2. Сезонная динамика концентрации РМ-2,5 Ni, Cu
Fig. 2. Seasonal dynamics of concentrations of Ni, Cu PM-2,5

Динамика концентрации химических элементов в аэрозолях воздуха различается по сезонам в зависимости от источников их поступления. Сезонная изменчивость содержания химических элементов в атмосфере с. Долонь зависит от нескольких факторов: почвенная эрозия, лесные пожары, сжигание твердого топлива. Также анализ полученных данных показал, что в про-

бах воздушных аэрозолей превышения предельно допустимых концентраций среднесуточного содержания химических элементов не обнаружено [16].

Как уже было отмечено выше, исследуемая территория расположена в районе прохождения одного из основных радиоактивных следов Семипалатинского испытательного полигона. Были обследованы основные естественные радионуклиды в твердых частицах аэрозолей воздуха. Значимые данные были получены только по содержанию ²³²Th. Максимальный пик возрастания уровня содержания исследуемого радионуклида приходится на июнь месяц, где объемная активность равна $2.0 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, что в принципе не превышает установленные допустимые уровни – $4.9 \cdot 10^{-3}$ Бк/м³ для Республики Казахстан.

Таблица 3. Удельная активность Th и U в почве с. Долонь, n=30

Table 3. Th and U specific activity in soil of Dolon vil., n=30

Элементы Elements	Удельная активность, Бк/кг/Specific activity, Bq/kg		
	Долонь Dolon	Кларк в верх. части конт. коры [27] Clarke in top cont. crust	Минимальная значимая удельная активность Minimum significant specific activity
²³² Th	$1.5 \cdot 10^{-5} \pm 8.1 \cdot 10^{-7}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^4$
²³⁸ U	$7.5 \cdot 10^{-6} \pm 7.5 \cdot 10^{-7}$	$3.1 \cdot 10^{-5}$	1000

Таблица 4. Среднее содержание элементов в почве с. Долонь, n=30

Table 4. Average content of elements in soil of Dolon vil., n=30

Элементы Elements	Среднее содержание, мг/кг/Average content, mg/kg		
	Долонь Dolon	Кларк в верх. части конт. коры [27] Clarke in top cont. crust	В почвах малых населенных пунктов [28] In soils of small settlements
Be	0,30±0,02	2,1	8,4
Cr	68±3	150	52,83
Mn	320±20	670	674,9
Fe	4900±490	40600	–
Co	4,8±0,2	17	10,7
Ni	16±1	62	28,35
Cu	11±1	39	34,7
Zn	<0,01	78	97,7
As	3,8±0,1	6,5	5,2
Mo	<0,01	1,5	3,7
Cd	<0,01	0,3	0,2
La	14±1	32	–
Ce	31±1	63	–
Pr	3,7±0,1	8,7	–
Nd	16±1	29	–
Sm	3,2±0,1	5,7	–
Pb	18±4	17	22,74
Th	3,8±0,2	9,3	–
U	0,60±0,06	2,5	–

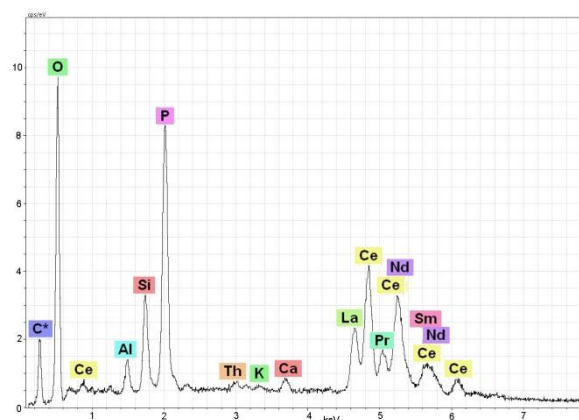
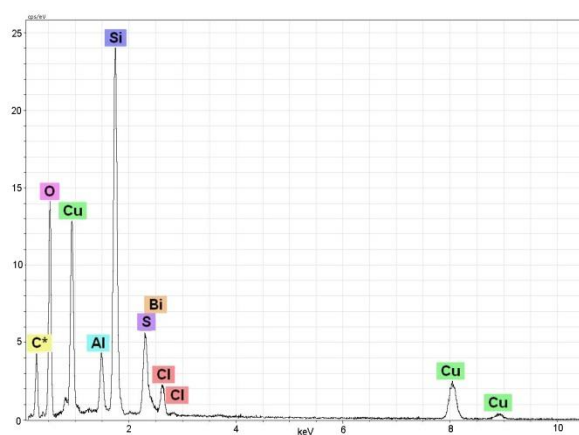
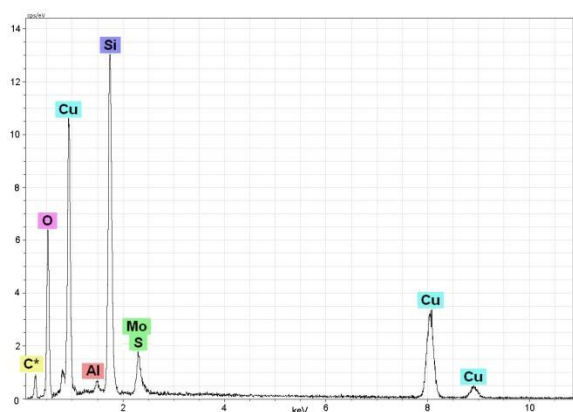
Примечание: «–» – нет данных

Note: «–» – not available

Химический состав твердых частиц аэрозолей воздуха непромышленных регионов формируется в большинстве случаев за счет природных факторов. По многочисленным литературным данным основным источником поступления химических элементов в атмосферный воздух не урбанизированных территорий в летний период является ветровая эрозия почвенного покрова [22–26]. По полученным данным, при средней скорости ветра

2–3 м/с в неотапительный период 2015 г. средняя запыленность воздуха села Долонь составила $0,07 \text{ мг/м}^3$. Для выявления вклада почвенно-эрозионных процессов в

формирование химического состава аэрозолей была определена концентрация элементов в почвенных образцах исследуемой территории (табл. 3, 4).



a/a



б/б



в/в

Рис. 3. PM-2,5, неотапительный сезон (а); PM-2,5, отопительный сезон (б); результаты электронной микроскопии почвы с. Долонь (в)

Fig. 3. PM-2,5, non-heating season (a); PM-2,5, heating season (b); results of electron microscopy of soil from Dolon vil. (c)

На исследуемой территории в образцах почвы превышения допустимых санитарных норм содержания изучаемых естественных радионуклидов и элементов не обнаружено. В исследуемых образцах почвы наблюдается накопление Pb. Среднее содержание свинца – на уровне кларка для верхней части континентальной коры [27].

В сравнении со средним содержанием в почвах малых населенных пунктов [28], в исследуемых образцах почвы с. Долонь обнаружены относительно высокие концентрации Fe, Cr, Th и U, а также РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd, Sm). Следует отметить, что более чем для половины редких металлов не установлены средние содержания в почвах Земли, сельских и сельскохозяйственных и техногенных ландшафтов.

По данным электронной микроскопии, в почвах с. Долонь обнаружено содержание редкоземельных элементов, которое значительно превышает их концентрацию в почвах малых населенных пунктов.

Заключение

Содержание химических элементов в твердых частицах аэрозолей воздуха исследуемых населенных пунктов, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону, имеет разную динамику распределения в зависимости от сезонов. Основными элементами-маркерами летнего, а также неотапливаемого периода, включая вторую декаду весны и первую половину осени по данным результатов с. Долонь, являются марганец, хром, железо, свинец, торий и группа редкоземельных элементов, а именно La, Pr, Nd, Sm. Отличительной чертой поведения содержания данной группы элементов в исследуемом населенном пункте является резкое повышение их концентрации в летний период и заметный спад к началу отопительного сезона. Наиболее заметные пики возрастания концентраций приходятся на летние месяцы в засушливый и сухой период. Из группы редкоземельных элементов специфично поведение содержания церия в твердых частицах аэрозолей воздуха. В целом динамика распределения содержания церия в летний период абсолютно схожа с поведением остальных элементов группы РЗЭ. Однако уровень его содержания в отопительный период постоянно поддерживается выбросами дымовых труб индивидуальных отопительных печей и котельной.

Характерной особенностью для образцов РМ-2,5, отобранных с населенных пунктов Бескарагай и Канонерка, является низкое содержание РЗЭ в неотапливаемый сезон, где основным источником их поступления в атмосферный воздух выступает почвенно-эрозионный процесс. Данная особенность свидетельствует об отсутствии в подстилающем слое почвенного покрова группы изучаемых РЗЭ, в сравнении с почвой с. Долонь. Повышенное содержание группы РЗЭ в отопительный сезон относительно их концен-

трации за летний сезон в образцах РМ-2,5 с. Бескарагай и Канонерка связано с процессом сжигания угля.

Также следует отметить, что в с. Бескарагай содержание Сг и Мп в твердых частицах аэрозолей воздуха в течение исследуемого периода было стабильным, что свидетельствует о наличии нескольких источников их поступления, основными из которых является почвенно-эрозионный процесс. В с. Канонерка содержание этих элементов имеет более динамичный характер. Так, в неотапливаемый период в образцах пыли содержание хрома и марганца были значительно меньше в сравнении с отопительным периодом.

Выявлено, что основным источником поступления Со и Cd в атмосферный воздух с. Долонь является процесс сжигания твердого топлива (уголь). Низкие значения в динамике распределения содержания данных элементов в неотапливаемый период в изучаемых образцах, возможно, связаны с другими источниками, для выявления которых требуются дополнительные исследования.

Стабильность динамики распределения содержания Ni, Cu, As, Mo, U независимо от периодов свидетельствует об их природном источнике поступления в атмосферный воздух исследуемой территории.

Таким образом, основными источниками поступления химических элементов в атмосферный воздух исследуемых населенных пунктов являются: почвенно-эрозионный процесс и процесс сжигания твердого топлива.

Анализ полученных данных показал, что в твердых частицах воздушных аэрозолей превышения предельно-допустимой концентрации среднесуточного содержания химических элементов не обнаружено.

В целом проведенные исследования не выявили явной связи между радиоактивным загрязнением Семипалатинского испытательного полигона и содержанием микроэлементов в воздухе поселков. Более того, полученные данные свидетельствуют о том, что состав элементов и их динамика в течение года во многом зависят от состава сырья для обеспечения теплом населенных пунктов, так как основным источником загрязнения атмосферного воздуха в них является печное отопление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Morphology, mineralogy, and chemistry of atmospheric aerosols nearby an active mining area: Aljustrel Mine (SW Portugal) / A. Barroso, S. Mogo, M. Manuela V. G. Silva, V. Cachorro, A. de Frutos // *Atmosphere*. – 2021. – V. 12 (3). URL: <https://doi.org/10.3390/atmos12030333> (дата обращения 15.09.2021).
2. Mmari A.G., Hassan H.A., Bencs L. Daytime concentrations of minor and trace elements in atmospheric aerosols at four sampling sites of Dar es Salaam, Tanzania // *Air Quality, Atmosphere & Health*. – 2020. – V. 13. – P. 739–750. URL: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00832-8> (дата обращения 15.09.2021).
3. Levels of selected metals in ambient air PM10 in an urban site of Zaragoza (Spain) / J.M. López, M.S. Callén, R. Murillo, T. García, M.V. Navarro, M.T. de la Cruz, A.M. Mastral // *Environmental Research*. – 2005. – V. 99 (1). – P. 58–67. DOI: 10.1016/j.envres.2005.01.007
4. Pongpiachan S., Iijima A. Assessment of selected metals in the ambient air PM10 in urban sites of Bangkok (Thailand) // *Environmental Science and Pollution Research International*. – 2016. – V. 23 (3). – P. 2948–2961. DOI: 10.1007/s11356-015-5877-5
5. Byeon S.H., Willis R., Peters T.M. Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM(2.5–1.0)) and coarse (PM(10–2.5)) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM) // *Environmental Research and Public Health*. – 2015. – V. 12 (2). – P. 2090–2104. DOI: 10.3390/ijerph120202090
6. On the morphology and composition of particulate matter in an urban environment / B. Zeb, K. Alam, A. Sorooshian, T. Blaschke, I. Ahmad, I. Shahid // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2018. – V. 18 (6). – P. 1431–1447. DOI: 10.4209/aaqr.2017.09.0340
7. PM10 composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece) / E. Remoundaki, A. Bourliva, P. Kokkalis, R.E. Mamouri, A. Papayannis, T. Grigoratos, C. Samara, M. Tsezos // *The Science of Total Environment*. – 2011. – V. 409 (20). – P. 4361–4372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.026
8. Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: local or regional pollution? / M.C. Mingüillón, X. Querol, U. Baltensperger, A.S. Prévôt // *The Science of the Total Environment*. – 2012. – V. 427–428. – P. 191–202. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.030
9. Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2.5 in the western coastal area of central Taiwan / C.Y. Hsu, H.C. Chiang, S.L. Lin, M.J. Chen, T.Y. Lin, Y.C. Chen // *The*

- Science of the Total Environment. – 2016. – V. 541. – P. 1139–1150. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.122.
10. Caggiano R., Sabia S., Speranza A. Trace elements and human health risks assessment of finer aerosol atmospheric particles (PM₁) // Environmental Science and Pollution Research International. – 2019. – V. 26 (36). – P. 36423–36433. DOI: 10.1007/s11356-019-06756-w.
11. Fractionation and health risks of atmospheric particle-bound As and heavy metals in summer and winter / Y. Sun, X. Hu, J. Wu, H. Lian, Y. Chen // The Science of the Total Environment. – 2014. – V. 493. – P. 487–494.
12. Лукашенко С.Н. Актуальные вопросы радиозащиты Казахстана. Вып. 5. – Павлодар: Дом печати, 2015. – 356 с.
13. ЕМЕП. Совместная Программа мониторинга и оценки дальнего атмосферного переноса загрязняющих веществ в Европе. 2002. URL: <https://www.twirpx.com/file/660296/> (дата обращения 15.09.2021).
14. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E). – Switzerland, 2003. – 30 p. URL: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (дата обращения 15.09.2021).
15. Элементный состав твердой фазы снегового покрова малых населенных пунктов (на примере села Долонь Восточно-Казахстанской области, Республика Казахстан) / А.Е. Темиржанова, М.Т. Дюсембаева, С.Н. Лукашенко, Е.Г. Язиков, Е.З. Шакенов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 41–50. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2937
16. Гигиенические нормативы к атмосферному воздуху в городских и сельских населенных пунктах. Утверждены приказом Министра национальной экономики Республики Казахстан от 28 февраля 2015 года № 168. – Астана: Адилет, 2015. – 322 с. URL: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/links> (дата обращения 15.09.2021).
17. Aerosol falls on snow cover on the outskirts of Siberian towns / V.F. Raputa, T.V. Khodzher, A.G. Gorshkov, K.P. Koutzenogii // Journal of Aerosol Science. – 1998. – V. 29 (2). – P. 807–808.
18. Арбузов С.И. Металлоносность углей Сибири // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77–83. URL: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2007/v311/i1/13.pdf (дата обращения 15.09.2021).
19. Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China / W. Hu, G. Downward, J.Y.Y. Wong, B. Reiss, N. Rothman, L. Portengen, J. Li, R.R. Jones, Y. Huang, K. Yang, Y. Chen, J. Xu, J. He, B. Bassig, W.J. Seow, H.D. Hosgood, L. Zhang, G. Wu, F. Wei, R. Vermeulen, Q. Lan // Scientific Reports. – 2020. – V. 10. – 11335. DOI: 10.1038/s41598-020-68229-2.
20. Particulate matter chemical component concentrations and sources in settings of household solid fuel use / M.H. Secrest, J.J. Schauer, E.M. Carter, J. Baumgartner // Indoor Air. – 2017. – V. 27 (6). – P. 1052–1066. DOI: 10.1111/ina.12389.
21. Impacts of stove/fuel use and outdoor air pollution on chemical composition of household particulate matter / A.M. Lai, S. Clark, E. Carter, M. Shan, K. Ni, X. Yang, J. Baumgartner, J.J. Schauer // Indoor Air. – 2020. – V. 30 (2). – P. 294–305. DOI: 10.1111/ina.12636.
22. Offor I.F., Adie G.U., Ana G.R. Review of particulate matter and elemental composition of aerosols at selected locations in Nigeria from 1985–2015 // Journal of Health and Pollution. – 2016. – V. 6 (10). – P. 1–18. DOI: 10.5696/2156-9614-6-10.1.
23. Atmospheric ambient trace element concentrations of PM₁₀ at urban and sub-urban sites: source apportionment and health risk estimation / Z. Bozkurt, E.O. Gaga, F. Taşpınar, A. Arı, B. Pekey, H. Pekey, T. Döğeroğlu, Ö.Ö. Üzmez // Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190 (3). – 168. DOI: 10.1007/s10661-018-6517-6.
24. Park K., Dam H.D. Characterization of metal aerosols in PM₁₀ from urban, industrial, and Asian Dust sources // Environmental Monitoring and Assessment. – 2010. – V. 160 (1–4). – P. 289–300. DOI: 10.1007/s10661-008-0695-6.
25. Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain / S. Rodriguez, X. Querol, A. Alastuey, M.M. Viana, M. Alarcón, E. Mantilla, C.R. Ruiz // The Science of the Total Environment. – 2004. – V. 328 (1–3). – P. 95–113. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00411-X.
26. Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy / A. Genga, T. Siciliano, M. Siciliano, D. Aiello, C. Tortorella // Environmental Monitoring and Assessment. – 2018. – V. 190 (8). – 456 p. DOI: 10.1007/s10661-018-6826-9
27. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2009. – 383 с.
28. Алексеев В.А. Химические элементы в геохимических системах. Кларки почв селитебных ландшафтов. – Ростов н/Д.: ЮФУ, 2013. – 388 с.

Поступила: 16.09.2021 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.

Дюсембаева М.Т., начальник лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Шакенов Е.З., инженер лаборатории элементного анализа Института радиационной безопасности и экологии Национального ядерного центра Республики Казахстан.

Мухамедияров Н.Ж., 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.

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

Колбин В.В., инженер лаборатории элементного анализа 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.

UDC 551.510.721:502 (574.41)

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

Aray E. Temirzhanova¹,
temirzhanova.aray@mail.ru

Egor G. Yazikov²,
yazikoveg@tpu.ru

Madina T. Dyusembayeva¹,
koigeldinova@nnc.kz

Erbol Z. Shakenov¹,
shakenov@nnc.kz

Nurlan Zh. Mukhamediyarov¹,
mukhamediyarov@nnc.kz

Azhar Zh. Tashekova¹,
Esenzholova@nnc.kz

Gani M. Esilkanov¹,
yessilkanov@nnc.kz

Vladimir V. Kolbin¹,
kolbin@nnc.kz

Murat A. Umarov¹,
Umarov@nnc.kz

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

² National Tomsk Research Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of this work is caused by the fact that there is a question of research to identify the content of chemical elements on one of the main traces of the «Vostochny» at Semipalatinsk Test Site and the surrounding area, including some small settlements, through the study of particulate matter of air aerosols. On the example of the villages Dolon, Beskaragay and Kanonerka the study of the elemental composition of particulate aerosols will give the most complete picture of the air quality of small settlements with similar climatic conditions. These settlements are located in the «Vostochny» trace and are not far from the conventionally marked boundaries of the Semipalatinsk Test Site. Among them, a particularly urgent issue is the study of the qualitative composition of the atmospheric air of the landfill itself and its surrounding areas. Particular interest is caused by chemical composition of solid aerosol particles (PM-2.5 – Particulate matter – solid aerosol particles with diameter less than 2,5 µm, PM-10 – Particulate matter – solid aerosol particles with diameter less than 10 µm, TSP – Total suspended particles) containing radioactive elements and heavy metals. Suspended matter smaller than 10 µm spreads over long distances and is a potential contaminant of major components of nature.

Objective: to determine the sources of chemical elements in the atmosphere of the settlements in the zone of impact of the «Vostochny» trace of radioactive fallout adjacent to the Semipalatinsk Test Site territory on the example of the villages Dolon, Beskaragay and Kanonerka, as well as to assess the quality of atmospheric air.

Objects: air aerosol particulate matter, soil.

Techniques: samples were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES), and scanning electron microscopy; internal quality control procedures were performed (comparison of results obtained by different methods of analysis); statistical processing of the results of the analysis of the main components of the environment studied; seasonal dynamics of element content distribution in solid particles of aerosol air of small settlements studied.

Results. The chemical (elemental) composition of 2,5 µm air aerosol particulate matter as well as soils of small settlements were studied. Seasonal dynamics of distribution of concentrations of chemical element groups under study was revealed. The analysis of seasonal variation in the chemical composition of air aerosols allowed their sources of entry to be revealed. No excess of MPC of the average daily content of standardized chemical elements including the group of heavy metals in air aerosol particulate matter was detected.

Key words:

Air aerosol particulate matter, soil, inductively coupled plasma mass spectrometer, naturally occurring radionuclides, heavy metals.

REFERENCES

- Barroso A., Mogo S., Silva M. Manuela V. G., Cachorro V., de Frutos Á. Morphology, mineralogy, and chemistry of atmospheric aerosols nearby an active mining area: Aljustrel Mine (SW Portugal). *Atmosphere*, 2021, vol. 12 (3). Available at: <https://doi.org/10.3390/atmos12030333> (accessed 15 September 2021).
- Mmari A.G., Hassan H.A., Bencs L. Daytime concentrations of minor and trace elements in atmospheric aerosols at four sampling sites of Dar es Salaam, Tanzania. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2020, vol. 13, pp. 739–750. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00832-8> (accessed 15 September 2021).
- López J.M., Callén M.S., Murillo R., García T., Navarro M.V., de la Cruz M.T., Mastral A.M. Levels of selected metals in ambient air PM10 in an urban site of Zaragoza (Spain). *Environmental Research*, 2005, vol. 99 (1), pp. 58–67. DOI: 10.1016/j.envres.2005.01.007
- Pongpiachan S., Iijima A. Assessment of selected metals in the ambient air PM10 in urban sites of Bangkok (Thailand). *Environmental Science and Pollution Research International*, 2016, vol. 23 (3), pp. 2948–2961. DOI: 10.1007/s11356-015-5877-5
- Byeon S.H., Willis R., Peters T.M. Chemical characterization of outdoor and subway fine (PM(2.5-1.0)) and coarse (PM(10-2.5)) particulate matter in Seoul (Korea) by computer-controlled scanning electron microscopy (CCSEM). *Environmental Research and*

- Public Health*, 2015, vol. 12 (2), pp. 2090–2104. DOI: 10.3390/ijerph120202090
6. Zeb B., Alam K., Sorooshian A., Blaschke T., Ahmad I., Shahid I. On the morphology and composition of particulate matter in an urban environment. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, vol. 18 (6), pp. 1431–1447. DOI: 10.4209/aaqr.2017.09.0340
7. Remoundaki E., Bourliava A., Kokkalis P., Mamouri R.E., Papanannis A., Grigoratos T., Samara C., Tsezos M. PM10 composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). *The Science of Total Environment*, 2011, vol. 409 (20), pp. 4361–4372. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2011.06.026
8. Minguillón M.C., Querol X., Baltensperger U., Prévôt A.S. Fine and coarse PM composition and sources in rural and urban sites in Switzerland: local or regional pollution? *The Science of the Total Environment*, 2012, vol. 427–428, pp. 191–202. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.04.030
9. Hsu C.Y., Chiang H.C., Lin S.L., Chen M.J., Lin T.Y., Chen Y.C. Elemental characterization and source apportionment of PM10 and PM2.5 in the western coastal area of central Taiwan. *The Science of the Total Environment*, 2016, vol. 541, pp. 1139–1150. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.122
10. Caggiano R., Sabia S., Speranza A. Trace elements and human health risks assessment of finer aerosol atmospheric particles (PM1). *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, vol. 26 (36), pp. 36423–36433. DOI: 10.1007/s11356-019-06756-w
11. Sun Y., Hu X., Wu J., Lian H., Chen Y. Fractionation and health risks of atmospheric particle-bound As and heavy metals in summer and winter. *The Science of the Total Environment*, 2014, vol. 493, pp. 487–494.
12. Lukashenko S.N. Aktualnye voprosy radioekologii Kazakhstana [Topical issues in radioecology of Kazakhstan]. Pavlodar, Dom pechati Publ., 2015. Iss. 5, 356 p.
13. EMEP. Sovmestnaya Programma monitoringa i otsenki dalnego atmosfernogo perenosa zagryaznyayushchikh veshchestv v Evrope [EMEP. Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the long-range transmissions of air pollutants in Europe]. 2002. Available at: <https://www.twirpx.com/file/660296/> (accessed 15 September 2021).
14. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) P. 2: Determination of 62 elements. ISO 17294-2:2003 (E). Switzerland. 2003. Available at: <https://www.iso.org/standard/36127.html> (accessed 15 September 2021).
15. Temirzhanova A.E., Dyusembayeva M.T., Lukashenko S.N., Yazikov E.G., Shakenov E.Z. Elemental composition of snow cover solid phase in small settlements (the case of Dolon village, Republic of Kazakhstan). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 12, pp. 41–50. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2020/12/2937
16. Gigienicheskie normativy k atmosfernomu vozdukh v gorodskikh i selskikh naselennykh punktakh. Utverzhdeny prikazom Ministra natsionalnoy ekonomiki Respubliki Kazakhstan ot 28 fevralya 2015 goda № 168 [Health Standards for the ambient air in urban and rural settlements. Approved by order of the Minister of National Economy of the Republic of Kazakhstan dated February 28, 2015 № 168]. Astana, Adilet Publ., 2015. 322 p. Available at: <http://adilet.zan.kz/rus/docs/V1500011036/links> (accessed 15 September 2021).
17. Raputa V.F., Khodzher T.V., Gorshkov A.G., Koutzenogii K.P. Aerosol falls on snow cover on the outskirts of Siberian towns. *Journal of Aerosol Science*, 1998, vol. 29, no. 2, pp. 807–808. In Rus.
18. Arbutov S.I. Metal-bearing capacity of coal in Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2007, vol. 311, no. 1, pp. 77–83. In Rus. Available at: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2007/v311/i1/13.pdf (accessed 15 September 2021).
19. Hu W., Downward G., Wong J.Y.Y., Reiss B., Rothman N., Portengen L., Li J., Jones R.R., Huang Y., Yang K., Chen Y., Xu J., He J., Bassig B., Seow W.J., Hosgood H.D., Zhang L., Wu G., Wei F., Vermeulen R., Lan Q. Characterization of outdoor air pollution from solid fuel combustion in Xuanwei and Fuyuan, a rural region of China. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, 11335. DOI: 10.1038/s41598-020-68229-2
20. Secrest M.H., Schauer J.J., Carter E.M., Baumgartner J. Particulate matter chemical component concentrations and sources in settings of household solid fuel use. *Indoor Air*, 2017, vol. 27 (6), pp. 1052–1066. DOI: 10.1111/ina.12389
21. Lai A.M., Clark S., Carter E., Shan M., Ni K., Yang X., Baumgartner J., Schauer J.J. Impacts of stove/fuel use and outdoor air pollution on chemical composition of household particulate matter. *Indoor Air*, 2020, vol. 30 (2), pp. 294–305. DOI: 10.1111/ina.12636
22. Offor I.F., Adie G.U., Ana G.R. Review of particulate matter and elemental composition of aerosols at selected locations in Nigeria from 1985–2015. *Journal of Health and Pollution*, 2016, vol. 6 (10), pp. 1–18. DOI: 10.5696/2156-9614-6-10.1
23. Bozkurt Z., Gaga E.O., Taşpınar F., Arı A., Pekey B., Pekey H., Döğeroğlu T., Özmez Ö.Ö. Atmospheric ambient trace element concentrations of PM10 at urban and sub-urban sites: source apportionment and health risk estimation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190 (3), 168. DOI: 10.1007/s10661-018-6517-6
24. Park K., Dam H.D. Characterization of metal aerosols in PM10 from urban, industrial, and Asian dust sources. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, vol. 160 (1–4), pp. 289–300. DOI: 10.1007/s10661-008-0695-6
25. Rodríguez S., Querol X., Alastuey A., Viana M.M., Alarcón M., Mantilla E., Ruiz C.R. Comparative PM10-PM2.5 source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *The Science of the Total Environment*, 2004, vol. 328 (1–3), pp. 95–113. DOI: 10.1016/S0048-9697(03)00411-X
26. Genga A., Siciliano T., Siciliano M., Aiello D., Tortorella C. Individual particle SEM-EDS analysis of atmospheric aerosols in rural, urban, and industrial sites of Central Italy. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2018, vol. 190 (8), 456. DOI: 10.1007/s10661-018-6826-9
27. Grigoryev N.A. Raspredelenie khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinentalnoy kory [Distribution of chemical elements in top continental crust]. Yekaterinburg, Ural Branch RAN Publ., 2009. 383 p.
28. Alekseyenko V. A. Khimicheskie elementy v geokhimicheskikh sistemakh. Klarki pochv selitebnykh landshaftov [Chemical elements in geochemical systems. Clarks of soils in landscapes intended for building]. Rostov-on-Don, SFedU Publ., 2013. 388 p.

Received: 16 September 2021.

Information about the authors

Aray E. Temirzhanova, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

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

Madina T. Dyusembayeva, head of the elemental analysis laboratory, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

Erbol Z. Shakenov, engineer, National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan.

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

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

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

Vladimir V. Kolbin, engineer, National Nuclear Center 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.