

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-4-36-42>

УДК 504.054

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ В СИСТЕМЕ «СНЕГОВОЙ ПОКРОВ – ПОЧВЕННЫЙ ПОКРОВ – РАСТИТЕЛЬНОСТЬ» НА ТЕРРИТОРИИ Г. ПАВЛОДАР И ПРИГОРОДА

А. А. Фаурат*, Г. С. Ажаев

Торайгыров университет, Павлодар, Казахстан

** E-mail для контактов: Alina03.09@mail.ru*

В статье представлены результаты исследования уровня загрязнения редкоземельными металлами на городских и пригородных садово-огородных участках города Павлодар. Павлодар, как индустриально развитый город, подвергается воздействию выбросов промышленных предприятий, транспорта и печного отопления, что делает его уязвимым к загрязнению редкоземельными металлами. Основное внимание уделено загрязнению лантаноидами в системе «осадки (снег) – почва – овощи»: накопление металлов в снегу, их миграция в почву и аккумуляция в растениях. Результаты показывают, что концентрации исследуемых элементов в твердой фазе снега убывают в следующем порядке (мг/кг): Ce (54,1) > La (27,9) > Nd (26,9) > Gd (5,8) > Dy (5) > Eu (1,4) > Ho (0,8) > Lu (0,3). В почвах концентрации металлов убывают в порядке (мг/кг): Ce (33,28) > La (15,41) > Nd (14,72) > Gd (3,74) > Lu (1,3) > Ho (1,01) > Eu (0,82) > Dy (0,39). Выявлено, что содержание металлов в снегу значительно превышает их концентрации в почвах, за исключением гольмия и лютеция, чьи концентрации выше в почве. Фоновые концентрации в снеговом покрове в среднем на 1,3 раза ниже городских. Металлы La и Ce имеют очень низкие значения накопления как для картофеля, так и для томата, хотя наблюдается незначительное превышение коэффициента бионакопления для картофеля. Эти данные важны для разработки мер по снижению загрязнения и охране здоровья населения.

Ключевые слова: редкоземельные металлы, снеговой покров, загрязнение почвы, биоаккумуляция, садово-дачные участки.

ВВЕДЕНИЕ

Группа редкоземельных металлов (РЗМ) включает 15 лантаноидов, которые представляют собой элементы с атомными номерами от 57 (лантан) до 71 (лютеций), а также скандий (Sc) и иттрий (Y). Лантаноиды включают церий (Ce), празеодим (Pr), неодим (Nd), прометий (Pm), самарий (Sm), европий (Eu), гадолиний (Gd), тербий (Tb), диспрозий (Dy), гольмий (Ho), эрбий (Er), тулий (Tm), иттербий (Yb) и лютеций (Lu) [1]. Редкоземельные металлы характеризуются уникальными геохимическими свойствами, которые позволяют им образовывать различные соединения и сплавы. Они известны своей высокой термической стабильностью и устойчивостью к окислению, что делает их ценными в высокопроизводительном использовании, таком как электроника, магниты и катализаторы [2].

За последнее десятилетие мировой спрос на редкоземельные элементы (РЗЭ) значительно возрос, что привело к увеличению их выбросов в окружающую среду [3]. Это вызвало беспокойство по поводу воздействия РЗЭ на окружающую среду и здоровье человека [4]. Основные источники выбросов редкоземельных элементов в воду и воздух – это процессы добычи и переработки полезных ископаемых, электростанции на мазуте и транспортные средства [5]. Редкоземельные металлы также накапливаются в сельскохозяйственных почвах при использовании удобрений, содержащих РЗЭ, или навоза животных, получавших добавки с металлами [6]. Лантаноиды в

почве и воде являются экотоксичными, так как могут поглощаться растениями и животными [7, 8].

Несмотря на то, что выбросы редкоземельных металлов вызывают загрязнение окружающей среды, исследования об их распространении, миграции и воздействии на экосистемы ограничены [5]. Большинство исследований по редкоземельным элементам сосредоточено на изучении геохимических процессов в природных системах [9], тогда как исследования, касающиеся содержания лантаноидов в осадках, воде, почве, а также их потенциальной биоаккумуляции в растениях, живых организмах, встречаются гораздо реже [10, 11]. В связи с вышесказанным, актуальны исследования, направленные на изучение распространения редкоземельных металлов в окружающей среде, а также их накопление в пищевой цепи [4].

Таким образом, целью нашего исследования являлось изучение содержания редкоземельных металлов в системе «снег-почва-овощи» в городских и пригородных садах и огородах. В рамках поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить содержание редкоземельных металлов в снеговом покрове, почве и овощах города Павлодар (1); выявить закономерности пространственного распределения содержания микроэлементов в исследуемых средах (городские и пригородные сады) (2); провести расчеты биоаккумуляции редкоземельных металлов из почвы в картофель и томаты, выращиваемые в городских и пригородных садах (3).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Город Павлодар расположен на Северо-востоке Казахстана. Город Павлодар – многопрофильный промышленный центр. Общая площадь составляет 326882 га (0,3 тыс. км²). К наиболее крупным промышленным предприятиям относятся алюминиевый, машиностроительный, химический, нефтехимический, судостроительный, судоремонтный, заводы металлоконструкций и электромонтажных изделий и другие. Кроме того, на территории города расположены 3 теплоэлектростанции, более 20 котельных и 5751 единица частного домостроения, которым в год сжигается в общей сложности более 3,5 млн тонн угля. В черте г. Павлодар находится свыше 60,3 тыс. садовых участков и сотни огородов частных домо-владений [12].

Город расположен на первой аккумулятивной надпойменной террасе реки Иртыш. Терраса постепенно переходит в озерно-эллювиальную денудационную равнину в восточной части города. Почвы приурочены к зоне каштановых почв, по механическому составу являющиеся легкосуглинистыми почвами [13].

Отбор проб проводился в 2023 году в различных районах города и его промышленных зонах (северной и восточной), пригорода согласно стандартным методическим рекомендациям (рисунок 1) [14].

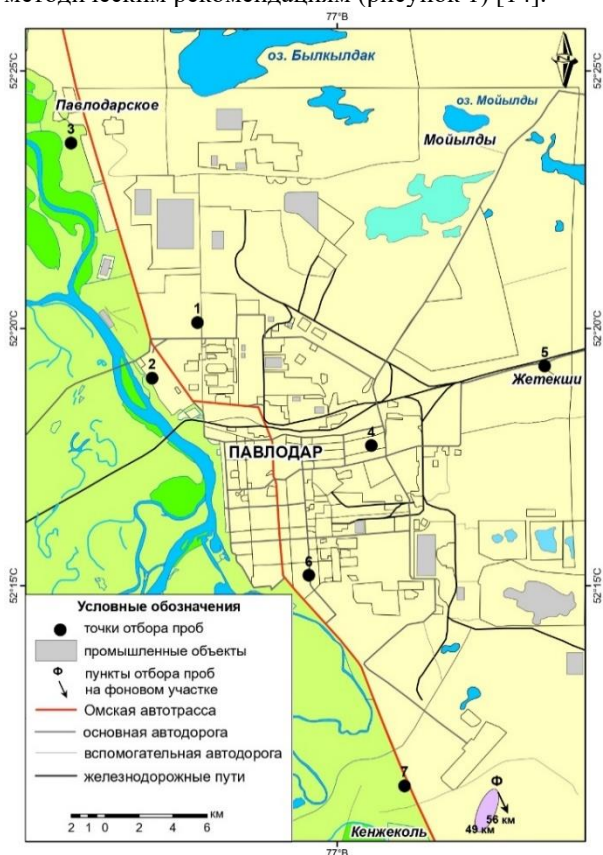


Рисунок 1. Расположение места отбора проб в городе Павлодар и пригороде. Участки 1, 2, 4, 6 – городские огороды; участки 3, 5, 7 – пригородные сады и огороды

В пределах города пробы снега и почв отбирались в зонах влияния крупных предприятий и объектов теплоснабжения, а также в садах и огородах. Пробы овощей отбирались на землях садово-дачных кооперативов и приусадебных участках, расположенных в городских и пригородных участках. Отбор проб снега осуществлялся в январе, при средней высоте снежного покрова – 60 см. Образцы почв отбирали с глубины 0–15 см. Отобрано и проанализировано по 32 проб снега и почвы, 16 проб овощей. На каждой пробной точке отбиралось по 2 образца: плоды томата (семейство Паслёновые (*Solanaceae*), *Solanum lycopersicum* L.) и клубни картофеля (семейство Паслёновые (*Solanaceae*), *Solanum tuberosum* L.) с целью определения накопления редкоземельных металлов в надземной и подземной частях растений. Выбор растений обусловлен повсеместным их возделыванием и значительной доле в рационе питания населения города. Фоновые пробы были взяты в более 50 км от города в противоположную сторону от преобладающих ветров.

Талая вода фильтровалась через фильтры обеззоленные «Синяя лента», специализированные фильтры для отделения от раствора мелкокристаллических осадков типа холодно-осаждённого сульфата бария, оксида меди и т.д. Полученный осадок после фильтрации талой воды просушивался, взвешивался и упаковывался для дальнейшей работы по определению содержания тяжелых металлов.

Пробы почвы весом не менее 1 кг просушивались на воздухе до воздушно-сухого веса. Влажные почвы сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 3–6 часов. Воздушно-сухие пробы просеивались через сито (полиамидное) с диаметром отверстий 1 мм. Методом квартования отбирался образец массой 200 г и истирался на дисковой мельнице «Pulverisette 9» (гарнитура – закаленная сталь) в течение 20 минут со скоростью вращения 1000 об/мин. Повторно отбирали из перемолотого гомогенного образца методом квартования навеску 50 г и дополнительно истирали в течение 20 минут.

Кислотное разложение образцов проводилось согласно методике № 499-АЭС/МС МКХА ГСИ РК за № KZ.07.00.03351-2016 во фторопластовых стаканах. Навеска каждого образца составляет 0,1 г. Вместе с анализируемыми образцами проводилось разложение одного контрольного образца, одного стандартного образца и одной холостой пробы. В каждый стакан перед началом разложения добавлялся раствор Nd, Dy, Yb с концентрацией 80, 50 и 30 мкг/л и ставился на плитку при температуре 130 °С. Далее в стаканы последовательно вносились и упаривались до влажных солей концентрированные кислоты HF, смесь HF:HNO₃ (3:1), HCl и HNO₃. После все образцы доводились 3М HNO₃, закрывались фторопластовыми крышками типа «часовое стекло» и прогревались 30 минут. Затем крышки снимались и растворы упаривались до появления интенсивных белых паров

при нагревании до 170–180 °С. Стаканы охлаждались, их стенки обмывались деионизированной H₂O. Полученные растворы снова упаривались до влажных солей. Затем в каждый стакан добавлялись HCl и H₃BO₃ и растворы упаривались до объема ≈0,7 мл. Полученные растворы переносились в вials с добавлением внутреннего стандарта In (1 мкг/л) и доводились нужного объема деионизированной H₂O. Перед проведением измерений все растворы разбавлялись деионизированной H₂O для лабораторного анализа в 10 раз.

Анализ содержания химических элементов в составе твердой фазы снега и почвы проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием Agilent 7700 X ICP-MS согласно МВИ № 499-АЭС/МС МКХА «Методика количественного химического анализа. Определение элементного состава горных пород, почв, грунтов и донных отложений атомно-эмиссионным с индуктивно связанной плазмой и масс-спектральным с индуктивно связанной плазмой методами» KZ.07.00.03351-2016.

РАСТЕНИЯ

Подготовка проб растений проводилась при помощи системы микроволнового разложения Speedwave Xpert. Для микроволнового разложения использовались фторопластовые автоклавы DAP60. Вместе с анализируемыми образцами проводилось разложение одного контрольного образца, одного стандартного образца и одной холостой пробы. Навеска 400 мг помещалась в автоклав с добавлением 5 мл HNO₃ и 3 мл H₂O₂ (3 раза по 1 мл раз в 10 минут). Смесь встряхивалась или перемешивалась фторопластовой палочкой. После автоклавы закрывались и помещались в саму микроволновую систему разложения. Разложение проходило по параметрам, представленных в таблице 1.

Таблица 1. Метод микроволнового разложения

Шаг	T [°C]	P [bar]	Время нагрева [min]	Время разложения [min]	Мощность [%]
1	150	30	10	5	50
2	190	35	5	15	80
3	50	25	1	10	0

Во избежание пенообразования и разбрызгивания сосуды остужались до комнатной температуры (около 20 мин.). Полученные растворы переносились в вials и доводились до необходимого объема деионизированной H₂O. Перед проведением измерений все растворы разбавляют деионизированной H₂O для лабораторного анализа в 10 раз.

Таблица 2. Содержание редкоземельных металлов в снеговом и почвенном покровах, мг/кг

Элемент	La	Ce	Nd	Eu	Gd	Dy	Ho	Lu
Снег	27,9±7,8	54,1±9,9	26,9±5,4	1,4±0,3	5,8±1,3	5,0±1,1	0,8±0,2	0,3±0,1
Почвы	15,41±2,14	33,28±4,5	14,72±1,94	0,82±0,06	3,74±0,47	0,39±0,07	1,01±0,14	1,30±0,14

Примечания: *среднее содержание, **среднеквадратичное (стандартное) отклонение

Пробы растительных образцов были разложены методом микроволнового разложения с использованием методических рекомендаций Berhof (Speedware Xpert) и методической инструкции М-МВИ-2008. Анализ на химические элементы в воде и в растительных образцах согласно методике ГОСТ ISO 17294-2019 Качество воды. Использование масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой.

В ходе исследования было проанализировано содержание 8 редкоземельных металлов: La, Ce, Nd, Eu, Gd, Dy, Lu, Ho.

Коэффициент аккумуляции металлов в растениях (биологического поглощения – КБП) рассчитывался по формуле:

$$КБП = \frac{C_{растение}}{C_{почва}}, \quad (1)$$

где $C_{растение}$ – это концентрация металлов в растениях; $C_{почва}$ – это концентрация металлов в почве.

Диапазон определения согласно методике № 499-АЭС/МС (для элементов La,Ce,Nd,Eu,Gd,Dy,Lu,Ho): 0,01 до 4000 п·10⁻⁴, массовая доля, %. Пределы обнаружения согласно методике ГОСТ ISO 17294-2-2019 (для элементов La,Ce,Nd,Eu,Gd,Dy,Lu,Ho): 0,1 мкг/л.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание редкоземельных металлов в твердой фазе снега, почве представлены в таблице 2. Наибольшие концентрации микроэлементов наблюдаются в твердой фазе снега, ряд убывания которых имеют следующий вид: Ce (54,1) > La (27,9) > Nd (26,9) > Gd (5,8) > Dy (5) > Eu (1,4) > Ho (0,8) > Lu (0,3). При анализе среднего содержания микроэлементов в твердой фазе снега было обнаружено, что содержание церия (Ce), лантана (La) и неодима (Nd) наиболее значимо. Содержание гадолиния и диспрозия составляет 5,8 и 5 мг/кг, соответственно, в то время как содержание лютеция минимально и составляет всего 0,3 мг/кг. Концентрация микроэлементов существенно варьировала между образцами в следующем диапазоне: La (18–57 мг/кг), Ce (38–79 мг/кг), Nd (19–40 мг/кг), Eu (0,9–2,3 мг/кг), Gd (4,2–9,5 мг/кг), Dy (3,5–7,9 мг/кг), Ho (0,6–1,3 мг/кг), Lu (0,2–0,5 мг/кг).

Ряд убывания среднего содержания редкоземельных металлов по городу Павлодар в почвах, имеет следующий вид: Ce (33,28) > La (15,41) > Nd (14,72) > Gd (3,74) > Lu (1,3) > Ho (1,01) > Eu (0,82) > Dy (0,39). Концентрация микроэлементов варьировала между образцами в следующем диапазоне: La (12–22 мг/кг), Ce (26–48 мг/кг), Nd (12–21 мг/кг), Eu (0,1–1,0 мг/кг), Gd (3–5,1 мг/кг), Dy (0,3–0,6 мг/кг), Ho (0,8–1,4 мг/кг), Lu (1,1–1,7 мг/кг).

При сравнении концентраций редкоземельных металлов в твердой фазе снега с данными по почвам выявлено, что содержание металлов в снеге значительно превышает их концентрации в почвах. Исключение составляют гольмий и лютеций, чьи концентрации в почве выше, чем в снежном покрове. Концентрация лютеция в почве превышает его содержание в снеге более чем в 4 раза. Концентрация диспрозия в твердой фазе снега почти в 13 раз выше, чем в почве, а концентрации остальных металлов (La, Ce, Nd, Eu, Gd) варьируются от 1,5 до 1,8 раз.

Наибольшее превышение концентраций в почвах города Павлодар наблюдается для следующих металлов: Lu (в 6,5 раза), Ho (в 3,3 раза) и Gd (в 2,3 раза) по сравнению с пахотным слоем сельскохозяйственных почв, исследованных в [15]. Однако концентрация Dy в Павлодаре оказалась ниже в 3,8 раза, чем представлено в исследовании. Превышение содержания остальных металлов варьируется от 1,4 до 1,8 раза. Концентрации редкоземельных металлов в почвах города Павлодар сопоставимы с данными исследований на техногенных землях и в районе воздействия Череповецкого металлургического комбината [15]. Исключением является лантан, концентрация которого в нашем исследовании оказалась в 1,6 раза ниже, а также лютеций (в 8 раз ниже) и гольмий (в 2,9 раза ниже). По сравнению с исследованиями, проведенными на территориях, прилегающих к автодорогам Польши [11], наши данные показывают более высокие концентрации металлов, что косвенно указывает на то, что загрязнение автотранспортом не является основным источником загрязнения рассматриваемых металлов.

При сравнении содержания редкоземельных металлов в снеговом покрове городских и пригородных огородов не отмечается значительной разницы (рисунок 2). Однако для концентраций лантаноидов в почвенном покрове наблюдается незначительная тенденция к превышению значений в городе.

Важно также отметить, что при определении коэффициента концентрации, то есть соотношения полученных данных к фоновым концентрациям лантаноидов, выявлено, что фоновые концентрации в снеговом покрове в среднем на 1,3 раза ниже городских. В то же время фоновые концентрации редкоземельных металлов в почвах практически идентичны городским.

Низкие концентрации РЗМ в почве по сравнению с концентрациями в твердых осадках (снегу) могут указывать на то, что эти металлы не задерживаются в почве и могут мигрировать в другие среды, такие как поверхностные воды, в результате таяния снега или дождя. Металлы могут быть мобильны в водных средах, особенно если они находятся в растворенной форме или прочно связаны с частицами, которые могут переноситься вместе с водой. Поэтому во время таяния снега или дождя металлы могут перемещаться с поверхности почвы в более глубокие слои почвы

или даже в прилегающие водные ресурсы [16]. Исследования также подтверждают, что большинство редкоземельных металлов могут адсорбироваться в почвах и отложениях благодаря их растворению и поверхностным комплексным реакциям с неорганическими и/или органическими лигандами [8].

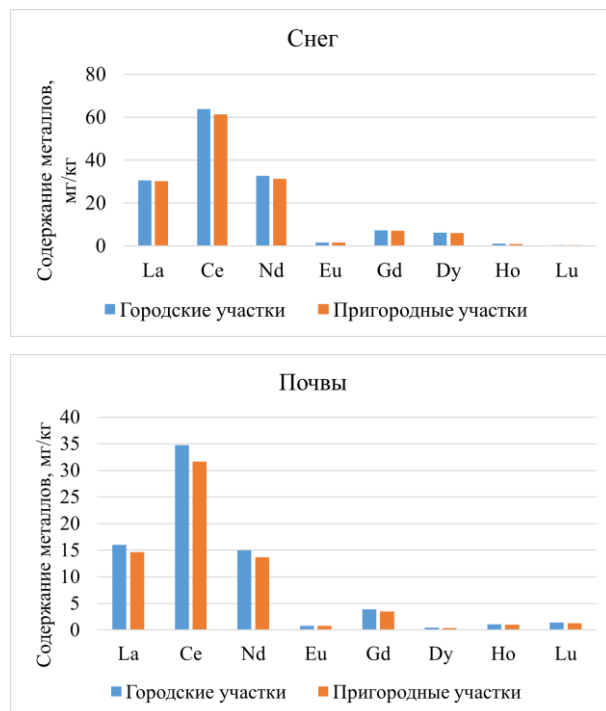


Рисунок 2. Содержание редкоземельных металлов в снеговом и почвенном покровах на различных территориях

При рассмотрении коэффициента биоаккумуляции лантаноидов в овощах, выращенных на исследуемых территориях, были получены следующие результаты (таблица 3, 4).

Таблица 3. Коэффициент аккумуляции РМ в овощах из почвенного покрова

Элемент	La		Ce	
	картофель	томат	картофель	томат
Коэффициент аккумуляции	0,002	0,00065	0,00093	0,0006

Большинство металлов, как в картофеле, так и в томатах, имеют очень низкий уровень накопления. Значения содержания Nd, Eu, Gd, Dy, Lu, Ho в овощах не превышают 0,01. Это указывает на то, что, несмотря на относительно высокие концентрации загрязнителей в почве, растения обладают механизмами, предотвращающими поступление этих металлов. Определяемые металлы La и Ce имеют очень низкие значения бионакопления, как для картофеля, так и для томата, хотя наблюдается незначительное превышения КБП для картофеля.

Таблица 4. Коэффициент аккумуляции РМ в овощах в пространственном аспекте

La					
<i>картофель</i>			<i>томат</i>		
всего	город	пригород	всего	город	пригород
0,03	0,017	0,04	0,01	0,012	менее 0,01
Ce					
<i>картофель</i>			<i>томат</i>		
всего	город	пригород	всего	город	пригород
0,06	0,031	0,081	0,02	0,018	0,018

Коэффициент биоаккумуляции незначительно варьируется между городскими и деревенскими садами. Наибольшая корреляция с распределением металлов в почве отмечается для картофеля. На коэффициент аккумуляции тяжелых металлов в томатах влияние произрастания в условиях города или деревни незначительное. Таким образом, наблюдается меньшая аккумуляция загрязняющих веществ из почв в наземные овощи и большая – в корнеплоды. Это может быть связано с высокой подвижностью этих металлов в почвах и их слабым удержанием по сравнению с другими токсичными элементами [17].

В сравнении с исследованиями по накоплению редкоземельных металлов в растениях на придорожных участках Польши [3], было установлено, что содержание лантана в надземных органах полыни обыкновенной на расстоянии 25 м от дороги составляет 0,08 мг/кг. В наших исследованиях содержание редкоземельных металлов в томатах составляет около 0,01 мг/кг, что в 8 раз меньше, чем в приведенных данных.

Источники загрязнения редкоземельными металлами

Исследований, посвященных загрязнению редкоземельными металлами окружающей среды недостаточно для формирования целостной картины поведения этих металлов в различных средах, а также влияния на здоровье людей, в том числе и посредством употребления в пищу овощей, выращенных в черте города. Некоторые исследования определяют недостаточные знания в области источников загрязнения РЗМ, миграции этих металлов, экотоксикологии, а также мер для минимизации экологических рисков [18]. В исследованиях 20-летней давности указано, что нормирования содержания редкоземельных металлов не имеется, их экотоксикологические свойства плохо изучены, возможно из-за отсутствия чувствительных и надежных количественных аналитических методов определения РЗМ [19].

С точки зрения геологии редкоземельные металлы не являются редкими по отношению к их содержанию в земной коре. Однако концентрированные залежи встречаются не часто [20].

Предполагаемая средняя концентрация РЗМ в земной коре составляет ≈ 250 мкг/г, что превышает

концентрацию многих других известных металлов. Се является наиболее распространенным среди редкоземельных металлов, что также подтверждается нашими исследованиями. В исследованиях [4] представлено, что Се, являющийся достаточно распространенным элементом (среднее содержание 67 мкг/г), более распространен, чем медь (55 мкг/г).

Что касается источников загрязнения металлами, то известно, что РЗМ выбрасываются из множества точечных и диффузных источников, включая медицинские и исследовательские учреждения, фармацевтическую промышленность, горнодобывающую и перерабатывающую промышленность, отходы электроники, электрооборудования, заводы по переработке РЗЭ, высокотехнологичные отрасли, удобрения и корма для скота [18].

Проанализировав литературные источники, было выявлено, что потенциальные источники попадания РЗМ в окружающую среду в городе Павлодар, могут быть ТЭЦ, работающие на сжигании угля, а также алюминиевое производство (алюминиевый и гидролизный заводы). В трудах [21] опубликовано, что в качестве сырья для получения редкоземельных металлов могут использоваться угольные месторождения, поскольку концентрации этих металлов во многих углях или угольной золе равны или во много раз выше, чем те, которые содержатся в обычных рудах РЗМ [21]. В качестве источника поступления РЗМ в окружающую среду может быть летучая зола. В исследованиях [22] при анализе золы на содержание редкоземельных металлов оказалось, что их содержание составляет 159,9 мкг/г. В целом, мировая угольная летучая зола содержит 445 мкг/г РЗМ и имеет потенциал быть источником этих металлов [23].

Шлам, который является отходом производства глинозема (оксида алюминия) из бокситов также может быть потенциальным источником поступления РЗМ. РЗМ были обнаружены в значительных количествах в красном шламе и могут достигать 500–1700 мкг/г [24].

Выводы

При анализе среднего содержания микроэлементов в твердой фазе снега было обнаружено, что содержание лантана (27,9 мг/кг) и церия (54,1 мг/кг) наиболее значимо. В почвах Павлодара, где выращиваются овощи, средние концентрации редкоземельных металлов убывают в следующем порядке: $Ce > La > Nd > Gd > Lu > Ho > Eu > Dy$. Сравнение показало, что содержание металлов в снегу значительно превышает их концентрации в почвах, кроме гольмия и лютеция. Коэффициент биоаккумуляции для овощей показал, что большинство металлов для картофеля и томатов относятся к незначительному уровню накопления как в городе, так и в пригороде. Однако необходимы дальнейшие исследования, направленные на изучение влияния редкоземельных металлов на растения, здоровья человека, а также их дальнейшую миграцию. В заключение следует отметить, что

присутствие редкоземельных металлов в снеге, почве и растениях может иметь последствия для окружающей среды и здоровья человека. Понимание путей загрязнения, поведения этих элементов в различных экологических средах и реализация эффективных стратегий рекультивации имеют важное значение для смягчения неблагоприятных последствий загрязнения редкоземельными металлами.

Работа выполнена в рамках проекта ИРН AP15473194 «Оценка накопления и распределения микроэлементов в атмосферных выпадениях (снеговой покров), почвах и овощных культурах урбанизированных территорий г. Павлодар» при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Brouziotis, A. A., Giarra, A., Libralato, G., Pagano, G., Guida, M., & Trifuoggi, M. Toxicity of rare earth elements: an overview on human health impact // *Frontiers in Environmental Science*. – 2022. – No. 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.948041>
2. Li, L. J., Huang, X., & Wei, H. The effect of re on the microstructure and properties of weld of 7075 aluminum alloy // *Applied Mechanics and Materials*. – 2013. – No. 456. – P. 521–524. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.456.521>
3. Mleczek, P., Borowiak, K., Budka, A., Szostek, M., Niedzielski, P. Possible sources of rare earth elements near different classes of road in Poland and their phytoextraction to herbaceous plant species // *Environmental Research*. – 2021. – No. 193. – P. 110580. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110580>
4. Balaram, V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // *Geoscience Frontiers*. – 2019. – No. 10(4). – P. 1285–1303. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
5. Arienzo, Monica M., Saftner, D., Bacon, S. N., Robtoy, E., Neveux, I., Schlauch, K., Carbone, M., Grzymalski, J. Naturally occurring metals in unregulated domestic wells in Nevada, USA // *Science of The Total Environment*. – 2022. – No. 851(2). – P. 158277. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158277>
6. Tommasi, F., Thomas, P. J., Pagano, G., Perono, G. A., Oral, R., Lyons, D. M., et al. Review of Rare Earth Elements as Fertilizers and Feed Additives: A Knowledge Gap Analysis // *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. – 2021. – No. 81(4). – P. 531–540. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00773-4>
7. Turra, C. Sustainability of rare earth elements chain: from production to food-a review // *International Journal of Environmental Health Research*. – 2018. – No. 28. – P. 23–42. <https://doi.org/10.1080/09603123.2017.1415307>
8. Adeel, M., Lee J. Y., Zain, M., Rizwan, M., Nawab, A., Ahmad, M.A., Shafiq, M., Yi, H., Jilani, G., Javed, R., Horton, R., Rui, Y., Tsang, D.C.W., Xing, B. Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms // *Environment International*. – 2019. – No. 127. – P. 785–800. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.022>
9. Han, R. and Xu, Z. Geochemical behaviors of rare earth elements (rees) in karst soils under different land-use types: a case in Yinjiang karst catchment, Southwest China // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2021. – No. 18(2). – P. 502. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020502>
10. Bakhshalizadeh, Shima & Liyafoyi, Adeleh & Mora Medina, Rafael & Ayala-Soldado, Nahúm. Bioaccumulation of rare earth elements and trace elements in different tissues of the golden grey mullet (*Chelon auratus*) in the southern Caspian Sea // *Environmental Geochemistry and Health*. – 2023. – No. 45. – P. 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01593-w>
11. Mleczek, P., Borowiak, K., Budka, A., Niedzielski, P. Relationship between concentration of rare earth elements in soil and their distribution in plants growing near a frequented road // *Environ Sci Pollut Res Int*. – 2018. – P. 23695–23711. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2428-x>
12. Гельдымамедова, Э. А. Тяжелые металлы в почвах г. Павлодар Республики Казахстан: дис... канд. биол. наук: 03.00.16. Павлодар, 2007. – 215 с. [Gel'dymamedova, E. A. Tyazhelye metally v pochvakh g. Pavlodar Respubliki Kazakhstan: dis... kand. biol. nauk: 03.00.16. Pavlodar, 2007. – 215 p. (In Russ.)]
13. Агроклиматические ресурсы Павлодарской области: научно-прикладной справочник / Под ред. С.С. Байшоланова – Астана, 2017. – 127 с. [Agroklimaticheskie resursy Pavlodarskoy oblasti: nauchno-prikladnoy spravochnik / Pod red. S.S. Baysholanova – Astana, 2017. – 127 p. (in Russ.)]
14. Методические рекомендации по проведению полевых и лабораторных исследований почв при контроле загрязнения окружающей среды металлами. – М.: Метеоиздат, 1982. – 109 с. [Metodicheskie rekomendatsii po provedeniyu polevykh i laboratornykh issledovaniy pochv pri kontrole zagryazneniya okruzhayushchey sredy metallami. – Moscow: Meteoizdat, 1982. – 109 p. (In Russ.)]
15. Ладонин, Д. В. Формы соединений тяжелых металлов в техногенно-загрязненных почвах. – М.: Издательство Московского университета, 2019. – 312 с. [Ladonin, D. V. Formy soedineniy tyazhelykh metallov v tekhnogenno-zagryaznennykh pochvakh. – Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 2019. – 312 p. (In Russ.)]
16. Kurochkin, I., Chugay, N., Kulagina, E. The assessment of soil contamination with heavy metals in the Vladimir city // *E3S Web Conf*. – 2021. – P. 03005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126503005>
17. Orisakwe, O.E., Dagur, E.A., Udowelle, N.A. Lead levels in vegetables from Artisanal Mining sites of Dilimi River, Bukuru and Barkin Ladi North Central Nigeria: Cancer and Non-Cancer Risk Assessment // *Asian Pac. J. Cancer Prev*. – 2017. – No. 18(3). – P. 621–627.
18. Gwenzi, W., Mangori, L., Danha, C., Chaukura, N., Dunjana, N., Sanganyado, E. Sources, behavior, and environmental and human health risks of high-technology rare earth elements as emerging contaminants // *Science of The Total Environment*. – 2018. – No. 636. – P. 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.235>
19. Petrovic, M., Gonzalez, S. and Barcelo, D. Analysis and Removal of Emerging Contaminants in Wastewater and Drinking Water // *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. – 2003. – No. 22. – P. 685–696. [https://doi.org/10.1016/S0165-9936\(03\)01105-1](https://doi.org/10.1016/S0165-9936(03)01105-1)

20. Chakhmouradian, A. R. and Wall, F. Rare earth elements: minerals, mines, magnets and more // Elements. – 2012. – No. 8(5). – P. 333–340. <https://doi.org/10.2113/gselements.8.5.333>
21. Zhang, W., Noble, A., Yang, X. and Honaker, R. A comprehensive review of rare earth elements recovery from coal-related materials // Minerals. – 2020. – No. 10. – P. 451. <https://doi.org/10.3390/min10050451>
22. Baron, R. Determination of rare earth elements in power plant wastes // Mining Machines. – 2020. – No. 4(164). – P. 24–30. <https://doi.org/10.2478/mspe-2020-0034>
23. Franus, W., Wiatros-Motyka, M. M. and Wdowin, M. Coal fly ash as a resource for rare earth elements // Environmental Science and Pollution Research. – 2015. – No. 22(12). – P. 9464–9474. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4111-9>
24. Akcil, A., Akhmediyeva, N., Abdulvaliyev, R., Abhilash and Meshram, P. Overview on extraction and separation of rare earth elements from red mud: focus on scandium // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2018. – No. 39(3). – P. 145–151. <https://doi.org/10.1080/08827508.2017.1288116>

ПАВЛОДАР ҚАЛАСЫ МЕН ҚАЛА МАҢЫНДАҒЫ «ҚАР ЖАМЫЛҒЫСЫ – ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫ – ӨСІМДІК ЖАМЫЛҒЫСЫ» ЖҮЙЕСІНДЕГІ СИРЕК ЖЕР МЕТАЛДАРЫНЫҢ ЛАСТАНУЫН БАҒАЛАУ

А. А. Фаурат*, Г. С. Ажаев

Торайғыров университеті, Павлодар, Қазақстан

** Байланыс үшін E-mail: Alina03.09@mail.ru*

Мақалада Павлодар қаласының қалалық және қала маңындағы бау-бақша учаскелеріндегі сирек жер металдарымен ластану деңгейі зерттеледі. Жауын – шашын (қар) – топырақ-көкөністер жүйесіндегі лантаноидтардың ластануына басты назар аударылады: қарда металдардың жиналуы, олардың топыраққа қоныс аударуы және өсімдіктерде жинақталуы. Павлодар индустриалды дамыған қала ретінде өнеркәсіптік кәсіпорындар, көлік және пеш жылыту шығарындыларының әсеріне ұшырайды, бұл оны сирек жер металдарымен ластануға осал етеді. Нәтижелер қардың қатты фазасындағы зерттелетін элементтердің концентрациясы келесі ретпен төмендейтінін көрсетеді (мг/кг): Ce (54,1) > La (27,9) > Nd (26,9) > Gd (5,8) > Dy (5) > Eu (1,4) > Ho (0,8) > Lu (0,3). Топырақта металл концентрациясы ретімен төмендейді (мг / кг): Ce (33,28) > La (15,41) > Nd (14,72) > Gd (3,74) > Lu (1,3) > Ho (1,01) > Eu (0,82) > Dy (0,39). Қардағы металдардың мөлшері топырақтағы концентрациядан едәуір жоғары екендігі анықталды, тек гольмий мен лютецийді қоспағанда, олардың концентрациясы топырақта жоғары. Қар жамылғысындағы фондық концентрациялар қалалықтардан орта есеппен 1,3 есе төмен. La және Ce металдары картоп пен қызанақ үшін өте төмен жинақтау мәндеріне ие, дегенмен картоп үшін Био жинақтау коэффициентінің шамалы асып кетуі байқалады. Бұл деректер ластануды азайту және халықтың денсаулығын сақтау шараларын әзірлеу үшін маңызды.

Түйін сөздер: сирек жер металдары, қар жамылғысы, топырақтың ластануы, биоаккумуляция, бау-бақша учаскелері.

ASSESSMENT OF RARE EARTH METALS POLLUTION IN THE SNOW COVER-SOIL COVER-VEGETATION SYSTEM IN THE TERRITORY OF THE CITY OF PAVLODAR AND ITS SUBURBS

A. A. Faurat*, G. S. Azhayev

Toraighyrov University, Pavlodar, Kazakhstan

** E-mail for contacts: Alina03.09@mail.ru*

The article studies the level of rare earth metal pollution in urban and suburban garden plots of the city of Pavlodar. The main attention is paid to lanthanide pollution in the system “precipitation (snow) – soil – vegetables”: accumulation of metals in snow, their migration to soil and accumulation in plants. Pavlodar, as an industrially developed city, is exposed to emissions from industrial enterprises, transport and stove heating, which makes it vulnerable to rare earth metal pollution. The results show that the concentrations of the investigated elements in the solid phase of snow decrease in the following order (mg/kg) Ce (54.1) > La (27.9) > Nd (26.9) > Gd (5.8) > Dy (5) > Eu (1.4) > Ho (0.8) > Lu (0.3). In soils, metal concentrations decreased in the following order (mg/kg) Ce (33.28) > La (15.41) > Nd (14.72) > Gd (3.74) > Lu (1.3) > Ho (1.01) > Eu (0.82) > Dy (0.39). It was found that the content of metals in snow significantly exceeds their concentrations in soil, except for holmium and lutetium, whose concentrations are higher in soil. Background concentrations in the snow cover are on average 1.3 times lower than urban concentrations. The metals La and Ce have very low accumulation values for both potato and tomato, although there is a slight excess of the bioaccumulation factor for potato. These data are important for the development of measures to reduce pollution and protect public health.

Keywords: rare earth metals, snow cover, soil contamination, bioaccumulation, garden plots.