

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

УДК 551.510.42:546.65 (571.56-25)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В АТМОСФЕРЕ ЯКУТСКА

© 2022 г. В. Н. Макаров^{1,*}¹ *Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН (ИМЗ СО РАН), ул. Мерзлотная, д. 36, г. Якутск, 677010 Россия***E-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru*

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 30.03.2022 г.

Принята к публикации 08.04.2022 г.

В течение 2019–2020 гг. изучалось распределение редкоземельных элементов (РЗЭ) в приземной атмосфере г. Якутск. Исследовался химический состав взвешенных веществ (ВВ) в летней и зимней (снежный покров) атмосфере. Установлено, что в летний сезон РЗЭ в комплексе с группой сидерофильных элементов концентрируются в атмосфере преимущественно в пылевой фракции взвешенных веществ (ВВ). В зимний сезон ВВ более дисперсны. Средняя концентрация РЗЭ в “летних” ВВ $(n-n) \cdot 10$, в “зимних” ВВ $- n \cdot 10^{-1} - n$ мг/кг. В системе “почва → ВВ пыль → ВВ снег” наблюдается равномерное понижение концентрации РЗЭ и постепенное уменьшение отношения La/Y. Основная масса РЗЭ (~ 99%) выпадает из атмосферы в теплый период года. Объем атмосферного поступления РЗЭ на территорию города составляет в среднем около 625 мкг/м² сут, в основном за счет La, Ce, Nd и Y. На участках геохимических аномалий в северной промышленной части города эта величина возрастает в 2–3 раза. Суммарное выпадение РЗЭ на территорию города составляет около $1.2 \cdot 10^{-2}\%$ от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы.

Ключевые слова: атмосфера, взвешенные вещества, город, редкоземельные элементы, снежный покров**DOI:** 10.31857/S0869780922030055

ВВЕДЕНИЕ

Загрязняющие воздух взвешенные вещества (ВВ) – твердые частицы, атмосферные аэрозоли, непосредственно поступающие в воздух, и частицы, образующиеся в процессе превращения газов. Размер частиц в воздухе колеблется от 0.01 до 100 мкм. Установлена серьезная угроза здоровью людей при их воздействии [15]. Уровень загрязнения ВВ – один из важнейших показателей качества воздуха. Взвешенные вещества – недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов; показатель вредности – резорбтивное действие, класс опасности – 3¹.

Угрозу здоровью населения могут представлять и присутствующие в ВВ химические элементы различного класса токсичности. В последнее время установлено, что редкоземельные элементы (РЗЭ) оказывают токсическое действие на людей, и поэтому возникает необходимость изучения распространения этой группы элементов в окружающей среде и разработки нормативов их

содержания в природных средах и продуктах питания. Предполагается, что лантаноиды не так токсичны, как некоторые другие тяжелые металлы и металлоиды, но они могут оказывать хроническое воздействие на организм человека и приводить к долгосрочным неблагоприятным эффектам, особенно в регионах с высокими уровнями РЗЭ [5, 12]. В то же время известны антиоксидантные эффекты, связанные с РЗЭ, при лечении многих заболеваний [14].

Информации о РЗЭ все еще относительно недостаточно, что приводит к неоднозначным мнениям относительно их токсического воздействия и общего влияния на здоровье населения. Остается практически не изученным распространение РЗЭ в окружающей среде селитебных зон, особенно в северных районах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На территории г. Якутск было проведено геохимическое изучение ВВ, присутствующих в приземной атмосфере в летний и зимний (по снежному покрову) сезоны. Для исследования ВВ в летней атмосфере на территории города было установлено 10 пылесборников (рис. 1а). Сбор пыли происходил в период с 17 июля по 15 октяб-

¹ ГН 2.1.6.3492-17 предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений (с изменениями на 31 мая 2018 года). URL: <https://docs.cntd.ru/document/556185926>

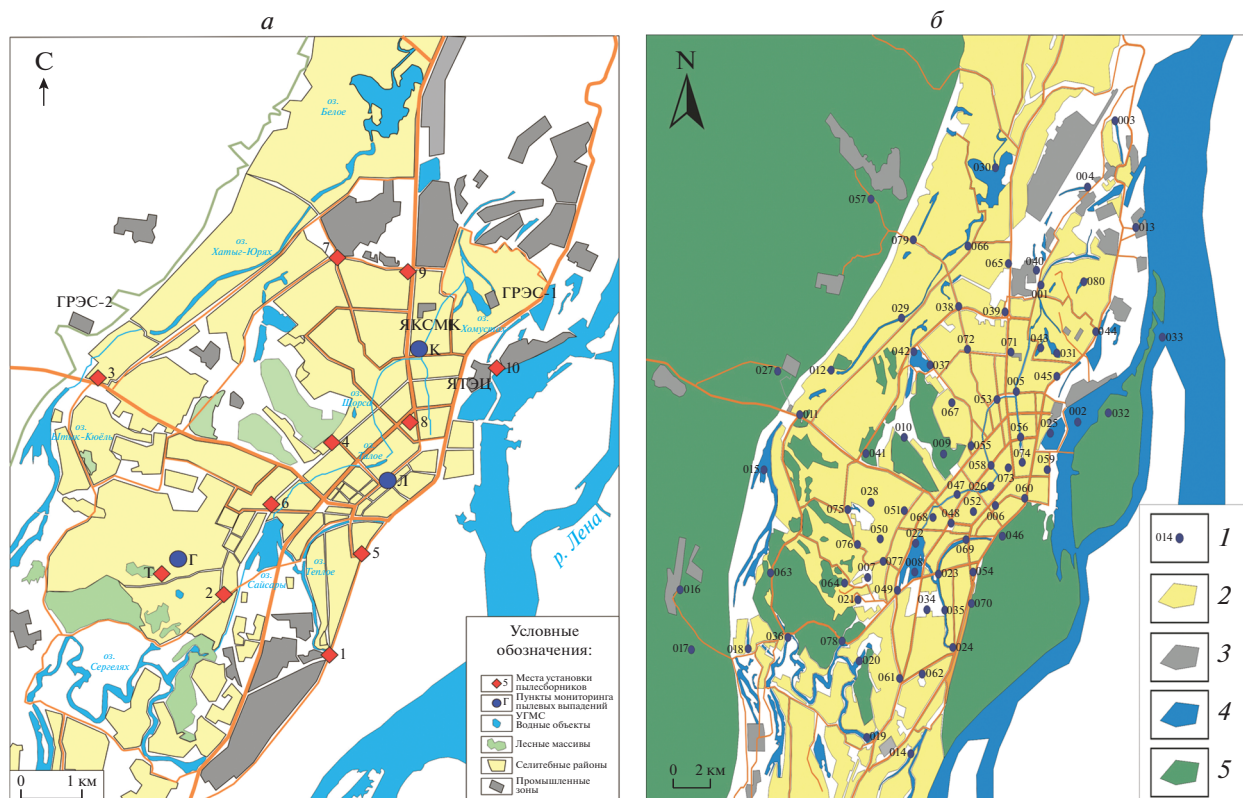


Рис. 1. Рис. 1. Схемы отбора проб: а – в летний период; б – в зимний период (1 – пункты отбора снега, 2 – жилые районы, 3 – промышленные зоны, 4 – река, озера, 5 – леса, луга).

ря 2019 г. Использовались также данные круглогодичного аэрогеохимического мониторинга на стационаре Института мерзлотоведения СО РАН “Туймаада”. Для получения сведений о зимней атмосфере в марте 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега (см. рис. 1б).

Фоновый участок наблюдений находился в районе оз. Чабыда в 25 км к юго-западу от города за пределами зоны техногенного воздействия.



Рис. 2. Отбор пробы снега (фото Н.В. Торговкина).

Пробы снега отбирались в оптимальный период для изучения снежного покрова, непосредственно перед началом таяния, в течение нескольких дней во второй половине марта. На точке наблюдений снег отбирался на площадке 30 × 30 см. Минимальная удаленность от проезжей части составляла не менее 30 м, в большинстве случаев – более 200 м. Для отбора пробы использовали маркированный по 0.5 см стеклянный цилиндр диаметром 82 мм со стальным окаймлением, который опускали с поверхности снежного покрова на плоскую прямоугольную стальную лопатку на высоте 1.5 см от почвы либо у поверхности льда (рис. 2).

Пробу упаковывали в пластиковый пакет, взвешивали для расчета массы снега и определения его плотности. Пробы ежедневно поступали в лабораторию ИМЗ СО РАН, где снег плавился при комнатной температуре. После полного таяния пробу разделяли на твердую и жидкую фазы путем фильтрования через бумажные фильтры “синяя лента” с диаметром пор 1 мкм.

Аналитическая обработка геохимических проб проведена в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова, Е.С. Петрова, О.В. Шепелева) и Аналитическом сертификационном испытатель-

Таблица 1. Концентрация РЗЭ в геологических компонентах зоны гипергенеза [6, 8]

Компоненты зоны гипергенеза	Коэффициент концентрации относительно КЗК [2]			Кол-во проб
	0.7–1.0	1.0–1.5	>1.5	
Породы, $aQ_{III}^4 - Q_{IV}^1$: галечник, пески, супеси, глина, торф	La, Yb, Sc	Y	–	124
Почвы города: урбаноземы, экраноземы	Yb, La, Sc	Y	–	1769

Примечание. КЗК – кларк земной коры.

ном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН. Содержание РЗЭ определялось атомно-эмиссионным (iCAP-6500, Thermo Scientific, США) и масс-спектральным (X-7, Thermo Elemental, США) методами анализа. Все анализы выполнены по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения и с необходимыми процедурами контроля.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Город Якутск располагается в среднем течении р. Лена в широкой долине Туймаада и протягивается вдоль левого берега реки на 20 км. Численность населения города 331 тыс. человек (01.01.2021 г.). Планировочная структура города радиально-кольцевая. Характер застройки неравномерный: на окраинах города – преимущественно одно- и двухэтажные деревянные строения, в центральной части – капитальная застройка каменными зданиями (от 4 до 16 этажей).

Якутск находится в зоне действия климата недостаточно влажного (индекс сухости от 1.0 до 2.0), умеренно теплого (в летний период), с суровой малоснежной зимой [4]. Среднегодовая температура воздуха за период непрерывных метеонаблюдений (1883–2020 гг.) варьирует в пределах $-7.2^{\circ}\text{C} \dots -12.1^{\circ}\text{C}$, среднегодовое количество осадков – 235 мм.

В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, ежегодно поставляющих в атмосферу 11 700 т загрязняющих веществ². Стационарные источники преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе, и предприятия стройиндустрии. По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тыс. единиц автотранспорта, выбра-

² Государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 г.: <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (дата обращения: 15.02.2021).

сывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей.

Геологическое строение района определяется его положением в зоне сочленения двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория находится на стыке Вилюйской лито-сидерофильной области с кларковым уровнем накопления V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской халькофильной зоны с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au [3]. Характер кларкового концентрирования РЗЭ в компонентах зоны гипергенеза, которые являются источниками вещества привносимого в атмосферу, приведен в табл. 1.

Аллювиальный комплекс $aQ_{III}^4 - Q_{IV}^1$ представлен в нижней части разреза галечниками и песками, а в верхней состоит из песков, супесей и суглинков, глин и торфа. В почвенном покрове на территории города доминируют урбаноземы и экраноземы различной мощности и генезиса. Как в породах аллювия, так и в почвах наблюдается кларковое присутствие большинства РЗЭ и незначительное накопление иттрия по сравнению с кларком земной коры.

Мощность многолетнемерзлых пород на территории города 250–450 м, сезоноталого слоя (СТС) – 1.5–2.0 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Редкоземельные элементы представляют собой группу из 15 элементов-лантаноидов: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, а также Sc и Y. По химическим они свойствам и совместному нахождению в природе делятся на подгруппы: иттриевую (Y, La, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) и цериевую (Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu). По атомной массе лантаноиды подразделяются на: легкие – La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, и тяжелые – Y, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu.

В мире наблюдается растущий интерес к распределению РЗЭ в окружающей среде, особенно в отношении токсического воздействия этих элементов.

Таблица 2. Фоновое содержание РЗЭ во ВВ в летней и зимней атмосфере, мг/кг

Элементы	Взвешенные вещества		Лето/Зима
	Летний период	Зимний период	
Sc	4.85	0.080	61
La	18.40	0.500	37
Ce	41.90	0.480	87
Pr	4.30	0.050	86
Nd	15.80	0.203	78
Sm	2.90	0.040	72
Eu	0.67	0.010	67
Gd	2.40	0.038	63
Tb	0.36	0.004	90
Dy	2.10	0.032	66
Ho	0.40	0.005	80
Er	1.20	0.015	80
Tm	0.16	0.001	160
Yb	1.10	0.015	73
Lu	0.16	0.002	80
Y	10.80	0.190	57
Сумма	107.50	1.665	65
%	99.3	0.7	—
La/Y	1.7	2.6	—

На территории Якутска проведено изучение распространения, концентрации и объема поступления РЗЭ на поверхность из летней и зимней приземной атмосферы.

Фоновое содержание РЗЭ во ВВ приземной атмосферы приведено в табл. 2.

Суммарное содержание РЗЭ во ВВ летней атмосферы, в окрестностях города за пределами техногенного воздействия — 107.50 мг/кг в 65 раз выше, чем в зимней — 1.66 мг/кг. Как в летних, так и зимних ВВ в атмосфере фонового района преобладают лантаноиды, роль которых максимальна в твердой фазе снежного покрова. Резкое преобладание РЗЭ в летней атмосферной пыли, близость и концентраций в ВВ, и в осадочных породах являются признаками интенсивного эолового поступления РЗЭ в атмосферу с поверхности земли и с интенсивными в июле—августе лесными пожарами. В зимнее время пылевое поступление в атмосферу за пределами городской территории практически отсутствует, что отражается в снижении концентрации РЗЭ во ВВ атмосферы почти на два порядка.

По данным анализа материала, собранного пылесборниками на территории города, ВВ в летней приземной атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. Дисперсный состав ВВ в

основном относится к собственно пыли: фракция PM_{10-100} — около 70% (PM — аббревиатура “particulate matter”, цифра показывает содержание всех частиц диаметром 10–100 мкм). Наблюдается преимущественное накопление РЗЭ в пылеватых фракциях, в комплексе с группой сидерофильных элементов: Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Sr, Zr, Sn, W, поступающих в атмосферу в основном с минералами группы железа.

Минеральный состав основной массы летних ВВ (PM_{10-100}) в атмосфере города представлен в легкой фракции кварцем и карбонатами (по 36%) и полевым шпатом (24%); в тяжелой — преимущественно амфиболами (49%), эпидотом и пироксенами (10–11%), ильменитом и гранатами (около 7%).

Более дисперсная зимняя пыль (PM_{10}) представлена, в основном, карбонатами (около 70%), углеродными соединениями (15%), включениями кварца и полевого шпата (10%) и железистого растительного детрита (5%).

Во ВВ городской атмосферы формируются геохимические аномалии тяжелых металлов, редких, рассеянных, радиоактивных и редкоземельных элементов природного и техногенного происхождения. В табл. 3 представлены усредненные данные по концентрации РЗЭ в ВВ летней и зимней городской атмосфере Якутска.

Суммарное содержание РЗЭ в ВВ в городской атмосфере Якутска изменяется от 125.4 мг/кг в летней до 46.4 мг/кг в зимний период. Содержание РЗЭ в ВВ летней атмосфере города почти в 3 раза выше, чем в зимней. Соотношение концентрации РЗЭ в городской атмосфере резко изменяется по сравнению с фоновой территорией. Если в летней городской атмосфере концентрация РЗЭ превышает фоновые значения, примерно на 20%, то в зимний период происходит резкое почти 30-кратное повышение концентрации РЗЭ над фоном.

Как в летней, так и в зимней приземной атмосфере Якутска легкие РЗЭ во ВВ преобладают над тяжелыми, примерно в равном соотношении 4:1, что соответствует кларковому для земной коры [2]. Содержание РЗЭ во ВВ атмосферы аналогично средней концентрации РЗЭ в городских почвах. В большинстве случаев концентрирование РЗЭ в почвах связано с присутствием ряда таких минералов, как апатит (Y, РЗЭ замещают Ca) и циркон (Y, ТРЗЭ замещают Zr), суммарная концентрация которых в тяжелой фракции минерального состава почв равна 7%. Примерно такое же количество апатита и циркона содержится в тяжелой фракции летних ВВ (PM_{10-100}) в атмосфере города ~ 6%.

РЗЭ во ВВ летней и зимней атмосферы формируют обширные малококонтрастные ореолы, при-

Таблица 3. Среднее содержание РЗЭ во ВВ летней и зимней городской атмосфере, мг/кг

Элементы	Взвешенные вещества					
	Летний период			Зимний период		
	Город	Фон	Город/фон	Город	Фон	Город/фон
Sc	5.87	4.85	1.2	3.22	0.080	40.2
La	23.50	18.40	1.3	7.32	0.500	14.6
Ce	45.80	41.90	1.1	15.56	0.480	32.4
Pr	5.10	4.30	1.2	1.71	0.050	34.2
Nd	18.90	15.80	1.2	7.09	0.203	34.9
Sm	3.50	2.90	1.2	1.51	0.040	37.8
Eu	0.82	0.67	1.2	0.36	0.010	36.0
Gd	2.80	2.40	1.2	1.19	0.038	31.3
Tb	0.42	0.36	1.2	0.17	0.004	42.5
Dy	2.40	2.10	1.1	1.05	0.032	32.8
Ho	0.47	0.40	1.2	0.20	0.005	40.0
Er	1.37	1.20	1.1	0.57	0.015	38.0
Tm	0.19	0.16	1.2	0.08	0.001	80.0
Yb	1.32	1.10	1.2	0.54	0.015	36.0
Lu	0.19	0.16	1.2	0.08	0.002	40.0
Y	12.70	10.80	1.2	5.70	0.190	30.0
Сумма	125.4	107.50	1.2	46.4	1.665	27.4
Сумма (без Sc)	119.5	102.7	—	43.2	1.58	27.3
La/Y	1.85	1.70	—	1.28	2.6	—

Таблица 4. Среднее содержание РЗЭ в компонентах окружающей среды

Природная среда		La	Ce	Nd	Y	Источники
Атмосфера						
Якутск	Аэрозоли лето, нг/л					
	Аэрозоли зима (снег), мкг/л	0.121	0.222	100	—	
	ВВ зима (снег), мг/кг	7.3	15.6	7.1	—	
	ВВ лето, мг/кг	23.5	45.8	18.9	—	
Литосфера, мг/кг						
Литосфера		30	60	37	20	[2]
Пески, песчаники		17–100	25–80	16–48	15–200	[13]
Почвы подзолистые		5–21	44–56	19–26	7–30	
Почво-грунты, Якутск		16.6	≥15	—	22.8	Автор
Гидросфера, мкг/л						
Надмерзлотные воды		5.82	11.75	4.92	3.37	[7]

мерно равные по площади, преимущественно в северной промышленной части города (рис. 3).

Среднее содержание РЗЭ в компонентах атмосферы и литосферы по мировым данным и в районе Якутска представлено в табл. 4.

Наблюдается равномерное понижение концентрации РЗЭ в городской окружающей среде: почвы → ВВ летние → ВВ зимние.

Величина коэффициента аэрозольной аккумуляции показывает, что при формировании аэрозолей концентрация РЗЭ во ВВ понижается на один математический порядок по сравнению с аллювиальными почвами Центральной Якутии, и для РЗЭ характерна отрицательная интенсивность аэрозольного обогащения. Пониженная концентрация РЗЭ в континентальных аэрозолях

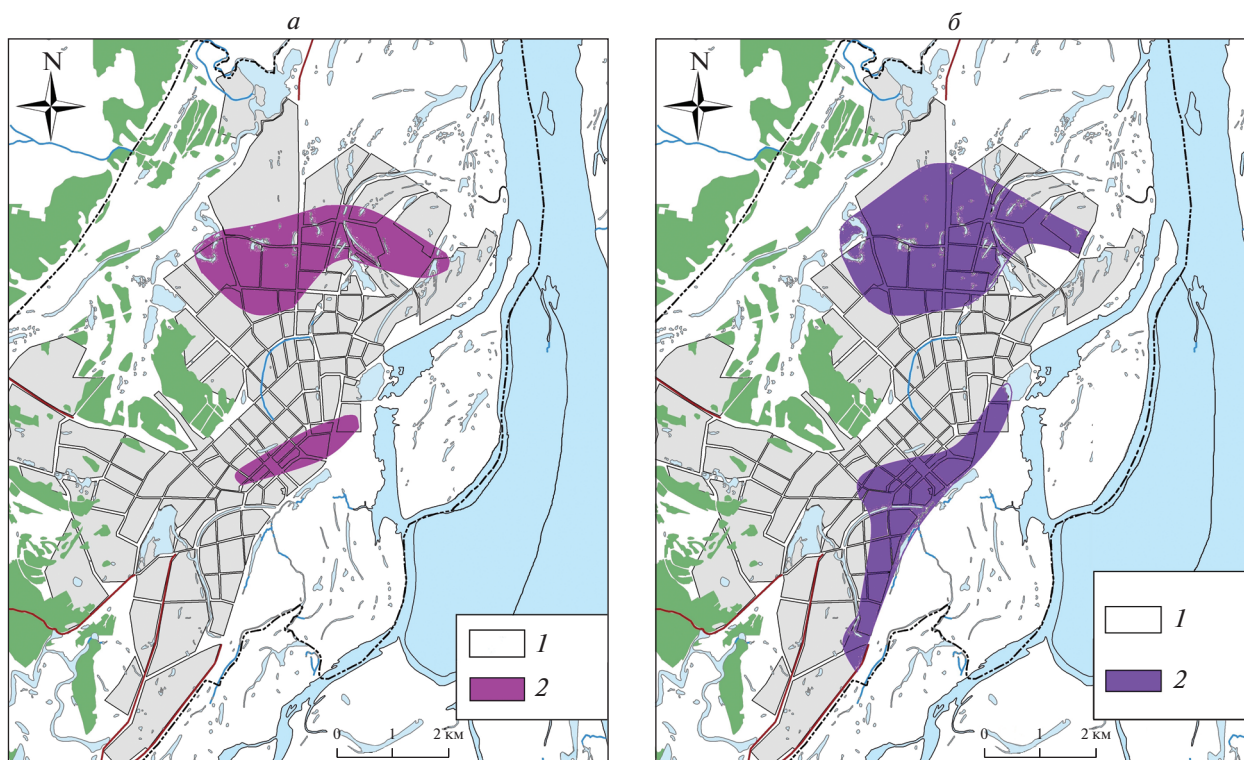


Рис. 3. Содержание РЗЭ (La, Ce, Y, Nb) в зимней атмосфере Якутска: *a* – растворимая фаза снежного покрова, содержание РЗЭ, нг/л: 1 – <500, 2 – >500; *б* – нерастворимая фаза снежного покрова, содержание РЗЭ, мг/кг: 1 – <40, 2 – >40.

района обусловлена составом исходного материала (преимущественно супесь и песок), поступающего в тропосферу в виде аэрозольных частиц.

Основная масса РЗЭ (~99%) выпадает из атмосферы в пылевой фазе в теплый период года. Ежедневное поступление РЗЭ из атмосферы в это время составляет в среднем $625 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$ (отношение $\text{La/Y} = 1.8$), с преобладанием в составе выпадений Ce, La и Nd (табл. 5).

На зимние твердые выпадения ВВ (преимущественно фракция PM_{10}) приходится всего около 1% от общей массы поступления РЗЭ из атмосферы на территорию города. Ежедневное суммарное поступление РЗЭ из атмосферы в холодный период на два порядка ниже, чем летом – $6.93 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$ (отношение $\text{La/Y} = 1.4$). Максимальный объем зимних атмосферных выпадений наблюдается для La и Ce около $1\text{--}2 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$ (см. табл. 5).

Основные объемы поступления РЗЭ из атмосферы (выше $>50 \text{ мкг/м}^2 \text{ сут}$) определяются выпадением группы легких РЗЭ (Ce, La, Nd) и Y. Как в летних, так и в зимних ВВ преобладает поступление Ce. По уменьшению объема выпадений РЗЭ образуют следующий ряд: $\text{Ce} > \text{La} > \text{Nd} > \text{Y}$.

В системе “породы–почвы” отношение La/Y практически идентично $0.73\text{--}0.84$. В летних и

зимних атмосферных ВВ отношение La/Y увеличивается почти в два раза, соответственно до $1.86\text{--}1.38$, за счет возрастания влияния цериевой группы. В связи с этим можно полагать, что в системе окружающей среды города: породы → почвы → атмосфера (ВВ), наблюдается некоторое улучшение экологической обстановки по РЗЭ, так как соединения подгруппы Ce (La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm) менее токсичны, чем соединения подгруппы Y (Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Sc, Y) [7].

Суммарный объем атмосферного поступления РЗЭ на территорию города оценивается цифрой около $633 \text{ мкг/м}^2 \text{ год}$, основную массу которого слагают Ce, La, Nd и Y. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать в 2–3 раза, также за счет этой группы РЗЭ.

Суммарное выпадение РЗЭ составляет примерно $1.2 \cdot 10^{-2}\%$ от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы Якутска.

В почвы и грунты СТС слоя территории города большая часть РЗЭ поступает из атмосферы. Преимущественное поступление РЗЭ с пылевыми фракциями ВВ ограничивает их миграционную способность в основном поверхностью почв и сезонно-талыми грунтами культурного слоя до глу-

Таблица 5. Ежегодное поступление РЗЭ из атмосферы в течение года, мкг/м² сут

Элементы	Взвешенные вещества		
	Летний период	Зимний период	Годовая сумма выпадений
La	118	1.089	119
Ce	229	2.309	231
Pr	25.5	0.241	26
Nd	94.5	0.957	95
Sm	17.5	0.196	18
Eu	4.1	0.042	4
Gd	14	0.159	14
Tb	2.1	0.022	2
Dy	12	0.134	12
Ho	2.4	0.027	2.4
Er	6.8	0.077	6.9
Tm	0.9	0.010	0.9
Yb	6.6	0.069	6.7
Lu	0.9	0.010	0.9
Y	63.5	0.789	64
Сумма	625	6.93	632
%	99	1	100
La/Y	1.86	1.38	1.86
La/Y	alQ		0.84
La/Y	Почвы		0.73

бины не превышающей 2 м, практически до кровли мерзлых грунтов.

Все РЗЭ по растворенным формам миграции химических элементов относятся к 8-электронным элементам-комплексообразователям, кото-

рые характеризуются низкой степенью растворимости своих гидрооксидных соединений, но способны к образованию растворимых комплексных соединений с ведущими катионами воды [1]. Поэтому некоторая часть РЗЭ способна переходить в растворимые формы и проникать в СТС, достигая надмерзлотных грунтовых вод. Сравнение концентрации РЗЭ в твердой фазе снежного покрова и в надмерзлотных водах, проведенное на ряде участков города, показало функциональную взаимосвязь концентрации La и Ce во ВВ зимней атмосферы и подземных водах (рис. 4).

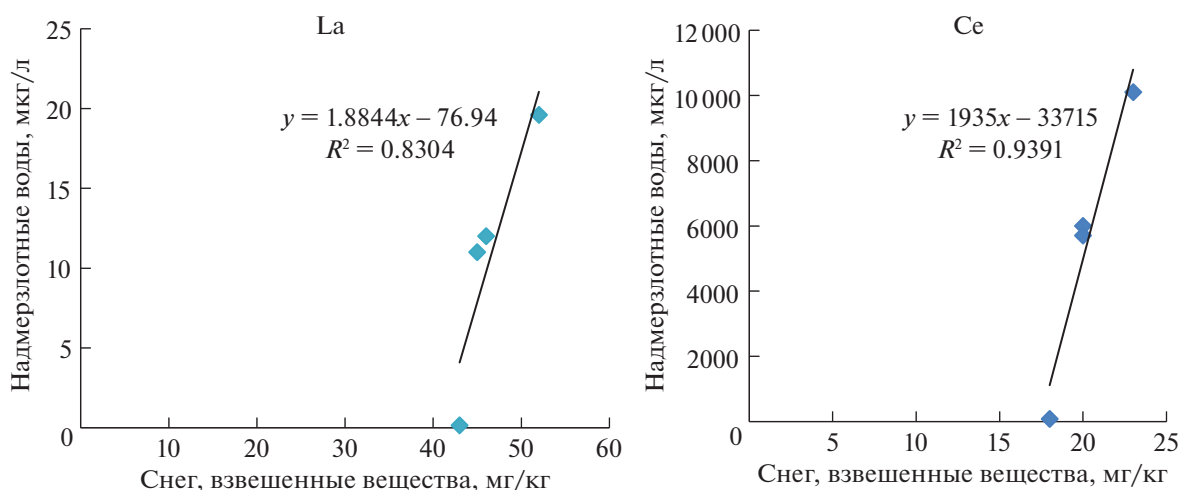
Подвижности РЗЭ в грунтах СТС и надмерзлотных водах способствует и определенная открытость грунтов, окислительно-восстановительный потенциал которых в СТС равен в среднем 419 мВ.

Наблюдаемая зависимость между концентрацией La и Ce в ВВ зимней атмосфере и надмерзлотных водах аналогичная таковой для Th и U, поскольку РЗЭ являются химическими аналогами актинидов [9–11].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии макро- и микроэлементов, в том числе и группы редкоземельных элементов. РЗЭ формируют обширные малоконтрастные ореолы преимущественно в северной промышленной части города.

ВВ в приземной летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. В летней атмосфере РЗЭ в комплексе с группой сидерофильных элементов концентрируются преимущественно в пылевой фракции ВВ (PM_{10–100}). Зимние ВВ в основном представлены фракцией PM₁₀.

**Рис. 4.** Концентрация РЗЭ в снежном покрове и надмерзлотных водах.

Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с РЗЭ, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: апатит и циркон, суммарная концентрация которых в тяжелой фракции летних ВВ равна 6%.

Концентрация РЗЭ равномерно понижается в системе: почвы → ВВ летние → ВВ зимние (снег). В почвах и в атмосфере (летних и зимних ВВ) преобладает группа легких РЗЭ.

Основная масса РЗЭ (~99%) выпадает из атмосферы в пылевой фазе в теплый период года. Ежедневное поступление РЗЭ из атмосферы на территорию города в это время составляет в среднем 625 мкг/м² сут (отношение La/Y = 1.8), в их составе преобладают Се, La и Nd. На зимние твердые выпадения ВВ приходится всего около 1% от общей массы поступления РЗЭ из атмосферы. Ежедневное суммарное поступление РЗЭ из атмосферы в холодный период на два порядка ниже, чем летом – 6.93 мкг/м² сут (отношение La/Y = 1.4). Максимальный объем атмосферных выпадений наблюдается для La и Се – 1–2 мкг/м² сут.

Общий объем поступления РЗЭ на территорию города – около 633 мкг/м² год (примерно 1.2 · 10⁻²% от годового объема поступления загрязняющих веществ из атмосферы). Основную массу выпадений слагают Се, La, Nd и Y. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать в 2–3 раза, также за счет этой группы РЗЭ.

Основными источниками поступления РЗЭ в приземную атмосферу Якутска являются пыление с поверхности почв и выбросы автотранспорта; в меньшей степени – выбросы объектов энергетики и стройиндустрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баренбойм Г.М., Авандеева О.П., Коркина Д.А. Редкоземельные элементы в водных объектах (экологические аспекты) // Вода: химия и экология. 2014. № 5. С. 42–55.
2. Виноградов А.П. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.
3. Геология и полезные ископаемые России. Т. 3. Восточная Сибирь. Спб.: ВСЕГЕИ, 2002. 396 с.
4. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. Геогр., 1959. № 3. С. 3–19.
5. Захаров И.С., Контрош Л.В., Храмов А.В., Шумилов О.И. К вопросу об экологической опасности редкоземельных металлов // Известия СПбГЭТУ “ЛЭТИ”. 2018. № 8. С. 91–97.
6. Макаров В.Н. Экогеохимия окружающей среды города, расположенного в криолитозоне (на примере Якутска) // Региональная экология. 2016. № 4 (46). С. 7–21.
7. Павлова Н.А., Данзанова М.В. Межгодовая изменчивость химического состава техногенных криопэггов на территории города Якутска // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 6. С. 26–34.
8. Подъячев Б.П. Геохимические аномалии благородных металлов в осадочных отложениях Якутского поднятия // Система коренной источник-россыпь. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 2009. С. 166–173.
9. Brookins D.G. Aqueous geochemistry of the rare earth elements // Rev. Mineral. Geochem., 1989. V. 21. P. 201–225.
10. Chapman N.A., McKinley I.G., Franca E.P., Shea M.E. and Smellie J. A.T. The Pocos-de-Caldas project – an introduction and summary of its implications for radioactive waste disposal // J. of Geochemical Exploration. 1992. V. 45. Is. 1–3. P. 1–24. [https://doi.org/10.1016/0375-6742\(92\)90120-W](https://doi.org/10.1016/0375-6742(92)90120-W)
11. Choppin G.R. Comparative solution chemistry of the 4f and 5f elements // J. Alloy. Compd., 1995. V. 223. Is. 2. P. 174–179. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(94\)09002-5](https://doi.org/10.1016/0925-8388(94)09002-5)
12. Zhang H., Feng J., Zhu W., Liu C., et al. Chronic toxicity of rare-earth elements on human beings: implications of blood biochemical indices in REE-high regions, South Jiangxi / Biol. Trace Elem. Res., 2000. V. 73. Is. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1385/BTER:73:1:1>
13. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, FL, USA: CRC Press/ & Francis Group Taylor. 2010. 548 p. <https://doi.org/10.1017/S0014479711000743>
14. Yuhui M., Jingkun W., Can P., Yayun D., et al. Toxicity of cerium and thorium on Daphnia magna / Ecotoxicol Environ Saf. 2016. № 134. P. 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.006>
15. Zereini F., Wiseman C.L.S. Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts Heidelberg: Springer–Verlag Berlin. 2011. 656 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12278-1>

RARE-EARTH ELEMENTS IN THE ATMOSPHERE OF YAKUTSK

V. N. Makarov^{a, #}

^a Melnikov Permafrost Institute, Siberian branch, Russian Academy of Sciences,
ul. Merzlotnaya, 36, Yakutsk, 677010 Russia

[#] E-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru

In 2019–2020, the distribution of rare-earth elements (REE) in the urban atmosphere of Yakutsk was studied. The chemical composition of particulate matter was examined in the summer and winter (the snow cover) atmosphere. The results indicate that in summer REE primarily concentrate in the dust fraction of particulate

matter, together with siderophilic elements. Wintertime particulate matter is more dispersed. The average REE concentrations are $0.0n-10n$ in the summer particulate matter and $0.0n-n$ mg/kg in the winter particulate matter. The system “soil – particulate matter dust – particulate matter snow” shows a uniform decrease in REE concentration and a gradual reduction in the La/Y ratio. The bulk of atmospheric REEs (about 99%) is deposited during summer. The average deposition flux for the city is $625 \mu\text{g}/\text{m}^2$ day, primarily consisting of La, Ce, Nd and Y. In the northern, industrial part of Yakutsk with more contrasting anomalies, the flux is two to three times higher. A total REE deposition comprises approximately $1.2 \cdot 10^{-2}\%$ of the annual atmospheric deposition of pollutants in Yakutsk.

Keywords: atmosphere, particulate matter, urban, rare-earth elements, snow cover

REFERENCES

1. Barenboim, G.M., Avandeeva, O.P., Korkina, D.A. *Redkozemel'nye elementy v vodnykh ob'ektakh (ekologicheskie aspekty)* [Rare earth elements in water bodies (ecological aspects)]. *Voda: khimiya i ekologiya*, 2014, no. 5, pp. 42–55. (in Russian)
2. Vinogradov, A.P. *Geokhimiya redkikh i rasseyannykh khimicheskikh elementov v pochvakh* [Geochemistry of rare and scattered chemical elements in soils]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (in Russian)
3. *Geologiya i poleznye iskopaemye Rossii* [Geology and minerals of Russia]. Vol. 3. Eastern Siberia. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2002, 396 p. (in Russian)
4. Grigoriev, A.A., Budyko, M.I. *Klassifikatsiya klimatov SSSR* [Classification of climates of the USSR]. *Izv. AN SSSR. Ser. geogr.*, 1959, no. 3, pp. 3–19. (in Russian)
5. Zakharov, I.S., Kontrosh, L.V., Khramov, A.V., Shumilov, O.I. *K voprosu ob ekologicheskoi opasnosti redkozemel'nykh metallov* [On the issue of ecological hazard of rare earth metals]. *Izvestiya SPbGETU “LETI”*, 2018, no. 8, pp. 91–97. (in Russian)
6. Makarov, V.N. *Ekogeokhimiya okruzhayushchei sredy goroda, raspolozhennogo v kriolitozone (na primere Yakutsk)* [Ecogeochemistry of the environment of a city located in the permafrost zone (on the example of Yakutsk)]. *Regional'naya ekologiya*, 2016, no. 4 (46), pp. 7–21. (in Russian)
7. Pavlova, N.A., Danzanova, M.V. *Mezhdogovaya izmenchivost' khimicheskogo sostava tekhnogennykh kriopegov na territorii goroda Yakutsk* [Interannual variability of the chemical composition of technogenic cryopegs on the territory of the city of Yakutsk]. *Kriosfera Zemli*, 2018, vol. XXII, no. 6, pp. 26–34. (in Russian)
8. Podyachev, B.P. *Geokhimicheskiye anomalii blagorodnykh metallov v osadochnykh otlozheniyakh Yakutskogo podnyatiya* [Geochemical anomalies of precious metals in sedimentary deposits of the Yakut uplift]. Primary source-placer system. Yakutsk, YSC SB RAS Publishing House, 2009, pp. 166–173. (in Russian)
9. Brookins, D.G. Aqueous geochemistry of the rare earth elements. *Rev. Mineral. Geochem.* 1989, vol. 21, pp. 201–225.
10. Chapman, N.A., McKinley, I.G., Franca, E.P., Shea, M.E. and Smellie, J.A.T. The Pocos-de-Caldas project – an introduction and summary of its implications for radioactive waste disposal. *J. Geochem. Explor.*, 1992, vol. 45, issues 1–3, pp. 1–24.
11. Choppin, G.R. Comparative solution chemistry of the 4f and 5f elements. *J. Alloy. Compd.*, 1995, vol. 223, issue 2, pp. 174–179.
12. Zhang, H., Feng, J., Zhu, W., Liu, C., Xu, S., et al. Chronic toxicity of rare-earth elements on human beings: implications of blood biochemical indices in REE-high regions, South Jiangxi. *Biol. Trace Elem. Res.*, 2000, vol. 73, no. 1, pp. 1–17.
13. Kabata-Pendias, A. Trace elements in soils and plants. Boca Raton, FL, USA, CRC Press / & Francis Group Taylor. 2010. 548 p.
14. Yuhui, M., Jingkun, W., Can, P., Yayun, D., Xiao, H., et al. Toxicity of cerium and thorium on *Daphnia magna*. *Ecotoxicol Environ Saf.*, 2016, no. 134, pp. 226–232.
15. Zereini, F., Wiseman, C.L.S. Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts. Heidelberg, Springer-Verlag Berlin, 2011. 656 p.