

АКТИНОИДЫ Th и U ВО ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВАХ АТМОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО ГОРОДА

© 2023 г. В. Н. Макаров*

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Мерзлотная, 36, Якутск, 677010 Россия

**e-mail: vnmakarov@mpi.ysn.ru*

Поступила в редакцию 03.06.2021 г.

После доработки 16.02.2022 г.

Принята к публикации 16.05.2022 г.

Исследовано распределение актиноидов Th и U в приземной атмосфере Якутска. В течение 2019–2020 гг. на территории города проводились исследования химического состава взвешенных веществ (ВВ) в летней атмосфере, твердой и жидкой фазах снежного покрова. В летней атмосфере Th и U концентрируются преимущественно в пылевой фракции ВВ, в комплексе с группой сидерофильных элементов. Зимние ВВ более однородны по размерам частиц. Специфическими минералами ВВ, которые коррелируют с актиноидами являются амфиболы и пироксены для Th, карбонаты для U. В ряду почва–летние ВВ (пыль)–зимние ВВ (снег) наблюдается равномерное уменьшение концентрации Th и U, при преобладании Th, но в жидкой фазе снега содержание U становится на порядок выше, чем Th. Основная масса актиноидов – около 90% выпадает из атмосферы в теплый период года. Общий объем атмосферного поступления актиноидов на территорию города составляет около 63 мг/м² год, 2/3 которого это Th. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать до 200 мг/м² год и более, при преобладании Th. Основными источниками поступления актиноидов в приземную атмосферу Якутска являются пыление с поверхности почв и выбросы автотранспорта. В меньшей степени – выбросы объектов энергетики и стройиндустрии.

Ключевые слова: город, атмосфера, взвешенные частицы, снег, дисперсия, минералы, актиноиды, торий, уран

DOI: 10.31857/S001675252301003X, **EDN:** IARTLD

ВВЕДЕНИЕ

Загрязняющие воздух взвешенные вещества (ВВ) – это собирательное понятие, включающее твердые частицы, атмосферные аэрозоли, непосредственно поступающие в воздух, и те частицы, которые образуются в процессе превращения газов. Установлена серьезная угроза здоровью людей при их воздействии (Urban airborne ..., 2011). Размер частиц в воздухе колеблется от 0.01 микрон (мкм) до 100 мкм.

Уровень загрязнения ВВ является одним из важнейших показателей качества воздуха, которым дышат люди. Взвешенные вещества – недифференцированная по составу пыль (аэрозоль), содержащаяся в воздухе населенных пунктов; показатель вредности – резорбтивное действие, класс опасности – 3.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На территории г. Якутска было проведено геохимическое изучение ВВ в летней и зимней (растворимой и твердой фазы снежного покрова) приземной атмосфере.

Для исследования ВВ летней атмосферы на территории города было установлено 10 пылесборников (рис. 1).

Сбор пыли происходил в период с 17 июля по 15 октября 2019 г. Использовались также данные круглогодичного аэрогеохимического мониторинга на стационаре Института мерзлотоведения СО РАН “Туймаада” и стационарных наблюдений гидрометеослужбы (ЯУГМС). Для получения сведений о зимней атмосфере в марте 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега. Фоновый участок наблюдений находился в районе оз. Чабыда в 25 км к юго-западу от города за пределами зоны техногенного воздействия (рис. 2).

Пробоотбор проводился в оптимальный период для изучения снега, непосредственно перед началом снеготаяния, в течение нескольких дней марта. Пробы снега на точке наблюдений отбирались на площадке 30 × 30 см (без снятия 1.5 см снега у почвы). 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 со стальным окаймлением диамет-

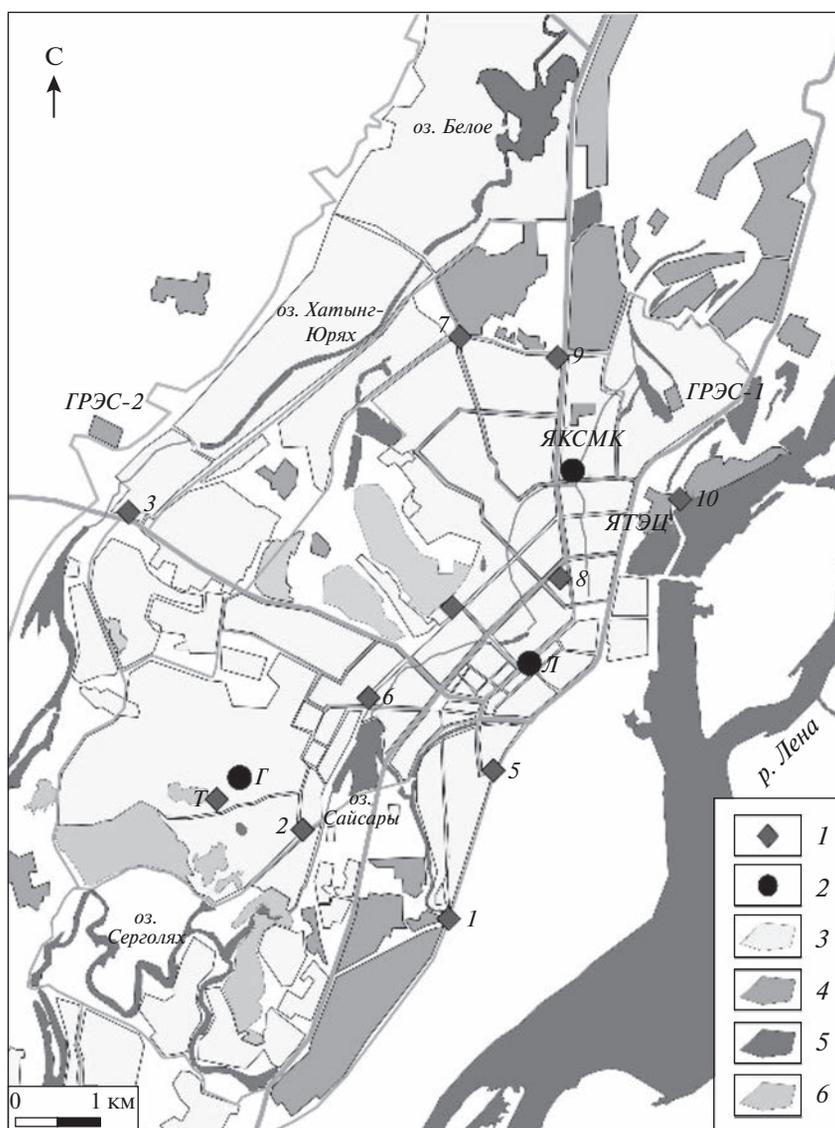


Рис. 1. Схема отбора проб в летний период. 1 – пункты наблюдений ЯУГМС; 2 – пылесборники; 3 – селитебная зона; 4 – промышленные зоны; 5 – река, озера; 6 – леса, луга.

ром 82 мм, который опускали с поверхности снежного покрова на плоскую прямоугольную стальную лопатку на высоте 1.5 см от почвы либо у поверхности льда. В каждом пункте выполняли 5–6 измерений толщины снежного покрова. Далее пробу помещали в пластиковый пакет и помещали на электронные весы для определения массы снега и расчета его плотности. Пробы ежедневно поступали в лабораторию Института мерзлотоведения 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. Данные о количестве и химическом составе ВВ в зимней атмосфере получены при изучении растворимой и твердой фаз снежного покрова.

Масса пыли в снеговой пробе служила основой для определения пылевой нагрузки P_n в $\text{мг}/(\text{м}^2 \text{сут})$, т.е. количества твердых выпадений за единицу времени на единицу площади (Саеи и др., 1990). Расчет проводился по формуле: $P_n = P/(St)$, где: P – масса пыли в пробе (мг); S – площадь шурфа (0.0053 м^2); t – время от начала снегостава до отбора проб снега (196 сут).

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 в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН. Содержание Th и U определялось масс-спек-

тральным (Х-7, Thermo Elemental, США) методом анализа.

Все анализы были выполнены по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения и с необходимыми процедурами внутреннего и внешнего аналитического контроля.

ОПИСАНИЕ РАЙОНА

Город Якутск располагается в среднем течении р. Лена, в широкой долине Туймаада и протягивается вдоль левого берега реки на 20 км. Якутск является крупнейшим и старейшим городом, расположенном в сплошной криолитозоне. По величине он является третьим городом в Дальневосточном федеральном округе после Владивостока и Хабаровска. Город интенсивно развивается, за последние годы численность населения возросла со 195 тыс. человек в 2000 г. до 331 тыс. человек в 2021 г.

Планировочная структура города радиально-кольцевая. Частая сетка улиц образует значительное количество небольших по площади кварталов (от 2 до 8 га). Проезжая часть улиц в основном приподнята. Характер застройки не ровный: на окраинах города — это преимущественно одно- и двухэтажные строения, в центральной части города — капитальная застройка каменными зданиями (от 4–5 до 9–16 этажей).

По классификации климатов (Григорьев, Будыко, 1959) 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. Преобладающими, в основные сезоны, являются континентальный воздух умеренных широт и арктический воздух. В районе города это ветра северного и северо-западного направления. Отличительной чертой ветрового режима является большая повторяемость штилей, особенно в декабре–феврале. Средняя скорость ветра в этот период составляет 0.8 м/с, при среднегодовых значениях — 2.4 м/с.

Среднегодовая температура воздуха за период непрерывных метеонаблюдений (1883–2020 гг.) варьирует в пределах от -7.2 до -12.1°C , среднегодовое количество осадков — 235 мм.

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

В городе насчитывается порядка 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу, и выбрасывающих ежегодно 11700 тонн загрязняющих веществ (Госдоклад, 2021). Стационарные источники выбросов преимущественно объекты теплоэнергетики: купные электростанции и многочисленные котельные, в основном работающие на газовом топливе, и предприятия стройиндустрии.

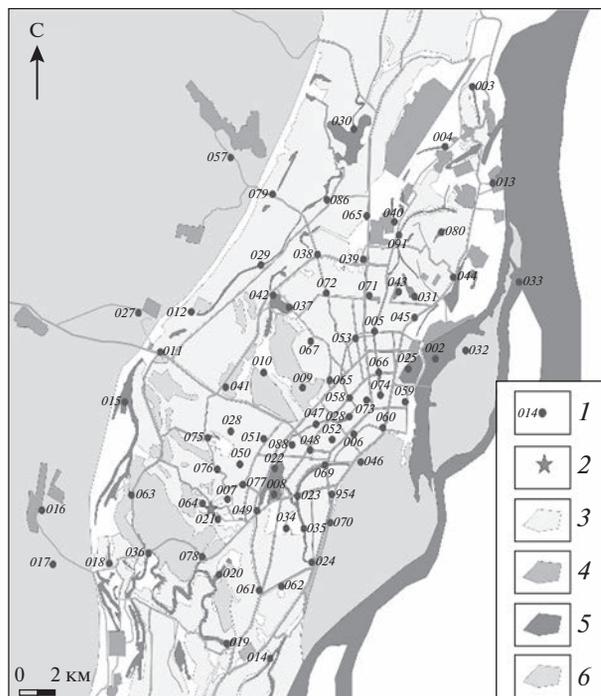


Рис. 2. Схема отбора ВВ в зимнее время. 1 — пункты отбора снега; 2 — стационар "Туймаада"; 3–6 — рис. 1.

По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тысяч единиц автотранспорта, выбрасывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей. Уровень загрязнения атмосферного воздуха г. Якутска оценивается как повышенный.

Геологическое строение района определяется его положением в зоне стыка двух крупных структур Сибирской платформы: Алданской антеклизы и Вилюйской синеклизы. В геохимическом отношении территория относится к Вилюйской лито-siderофильной области с накоплением V, Ti, Mn, P, Sb, Sn, Li, Nb, U и Лено-Алданской халькофильной зоне с накоплением Se, Pb, Ag, Bi, Au (Геология ..., 2002) относительно кларка земной коры. Геохимический состав компонентов зоны гипергенеза, которые могут быть источниками вещества привносимого в атмосферу приведен в табл. 1.

Аллювиальный комплекс голоцена представлен в нижней части разреза комплекса галечниками и песками, а в верхней состоит из песков, супесей и суглинков. В почвенном покрове на территории города доминируют урбаноземы и экраноземы различной мощности и характера образования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По данным анализа материала, собранного пылесборниками, ВВ в приземной летней атмосфере

Таблица 1. Коэффициент концентрации элементов в геологических составляющих зоны гипергенеза (Макаров, 2016; Подъячев, 2009)

Компоненты зоны гипергенеза	Коэффициент концентрации относительно кларка земной коры (Виноградов, 1962)					Кол-во проб
	0.7–1.0	1.0–1.5	1.5–2.0	>2.0	>5.0	
Аллювий, Q	P, V, Cr, Ni, Mn, Y, Zn, Cu, Ca, Ge, Nb, La, Yb, Sc, Ti, U, Th	Li, Be, Sn, B Mo, Au	Ag, Pb, W	Co	–	124
Почвы города	Li, P, V, Cr, Ni, Cu, Ca, Ge, Nb, Sn, La	Ti, Mn, Zn, Y, Mo, Tl, U, Th	W	B, Ag, Pb, Co	Hg	1769

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). Для Th и U наблюдается преимущественное накопление в пылеватых фракциях, в комплексе с группой сидерофильных элементов – Ti, Mn, Co, Ni, Zn, Ga, Sr, Zr, Sn, La, W, поступающих в атмосферу в основном с минералами группы железа. В более дисперсных частицах PM_{10} концентрируются халькофильные – Cu, Cd, Pb, Sc, Y. Остаются инертными, присутствующими примерно в равных концентрациях в различных фракциях ВВ, лито-

фильные породообразующие элементы – Be, V, Cr, Nb, Mo, Ag.

Поступление из атмосферы ВВ на почвенную поверхность в центральной части города в теплое время года составляет в среднем 5 г/м² сут (медиана – 4.3) и колеблется от 1.6 до 9.5 в районах высокой транспортной нагрузки.

Минералогический 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}) сложена в основном карбонатами (около 70%), углистыми соединениями (15%), включениями кварца и полевого шпата (10%) и ожелезненного растительного детрита (5%). Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с актиноидами, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: для Th пироксены и амфиболы, для U карбонаты и амфиболы.

Наиболее высокие содержания в “зимней” пыли (нерастворимой фазе снега) характерны для комплекса тяжелых металлов, редких, редкоземельных и радиоактивных элементов: Li, Mg, Al, P, S, Ca, Ti, V, Cr, Fe, Cu, Zn, Zr, Mo, Sb, Hf, Pt, Hg, R, U. Максимальная техногенная трансформация в городской “зимней” пыли (коэффициент концентрации относительно фоновых содержаний, $KK > 50$) характерна для As, Na, V, Co, Ta и W.

Химический состав городских снеговых вод хлоридно-гидрокарбонатный, с резко возрастающей по сравнению с фоном ролью кальция и щелочностью. Техногенное воздействие городского хозяйства отражается на повышении концентрации в снежном покрове большинства химических компонентов: кальция, магния и натрия, аммония, сульфатов, карбонатов, хлоридов. Распределение химических компонентов в снежном покрове Якутска приведено в табл. 2.

По уровню техногенной трансформации аэрозольно-газовой составляющей зимних выпадений макрокомпоненты и актиноиды группиру-

Таблица 2. Распределение макрокомпонентов, соединений азота и актиноидов в снежном покрове (зима 2019–2020 г.)

Компоненты	Ед. изм.	$C_{мин}$	$C_{макс}$	$C_{арифм}$	$C_{геом}$
pH	–	6.77	7.70	7.30	7.29
Eh, мВ	мВ	441	553	494	493
Ca ²⁺	мг/л	1.40	17.71	8.53	7.62
Mg ²⁺	»	0.40	24.89	1.87	1.42
Na ⁺	»	0.01	110.0	3.06	1.41
K ⁺	»	0.10	2.10	0.47	0.41
NH ₄ ⁺	»	0.60	12.0	1.85	1.50
HCO ₃ ⁻	»	10.72	87.4	31.17	28.80
SO ₄ ²⁻	»	0.70	104.0	3.17	1.80
Cl ⁻	»	1.11	133.9	5.28	3.42
NO ₂ ⁻	»	0.01	1.00	0.38	0.28
NO ₃ ⁻	»	0.86	2.50	1.43	1.40
Минерализация	»	14.68	74.41	41.61	35.77
Th	нг/л	0.9	25.0	7.6	6.3
U	»	8.6	844.5	67.8	43.9

Примечания. Содержание: $C_{мин}$ – минимальное, $C_{макс}$ – максимальное, $C_{арифм}$ – среднее арифметическое, $C_{геом}$ – среднее геометрическое.

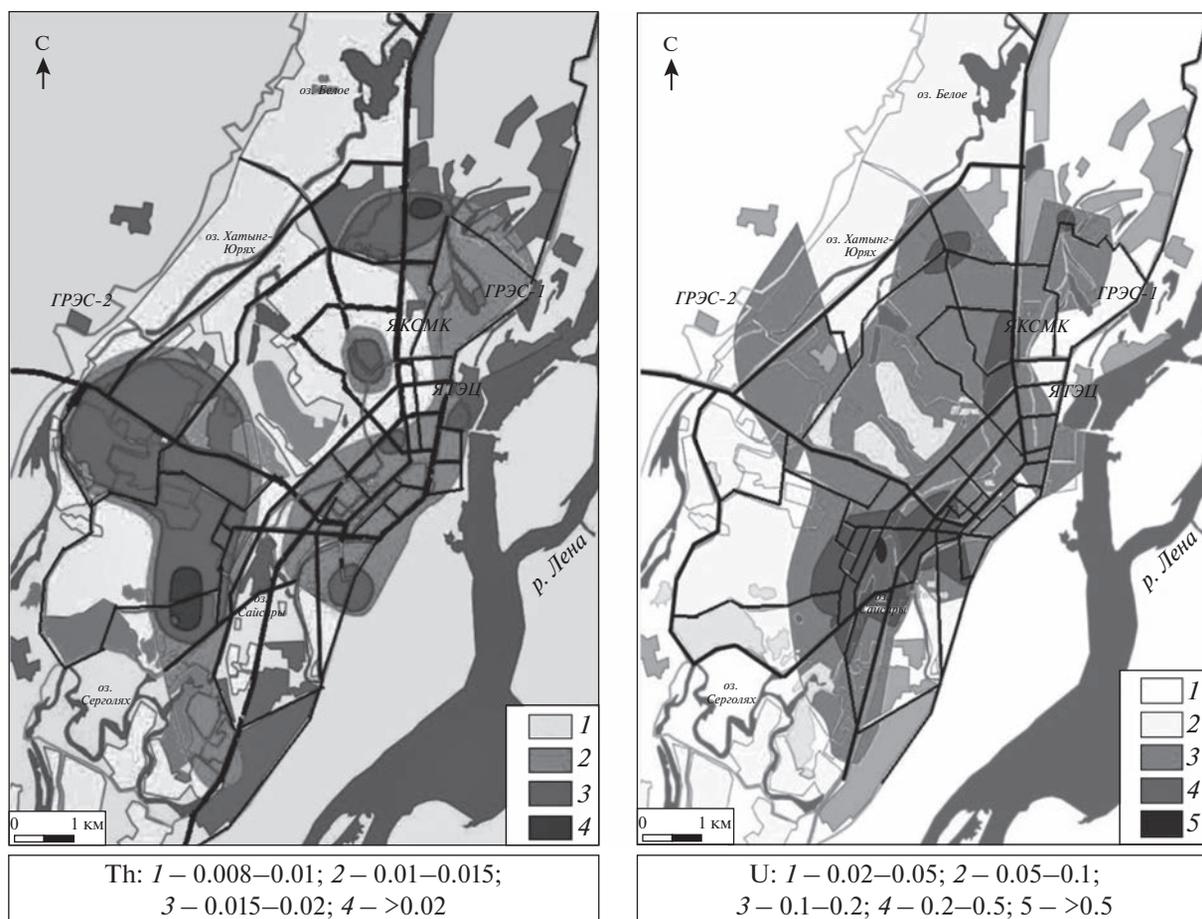


Рис. 3. Содержание актиноидов в растворимой фазе снежного покрова, мкг/л.

ются от максимальных значений коэффициента концентрации относительно фона для $Ca^{2+} = 12$ до минимальных для $K^+ = 1.3$ ($U = 6.6$; $Th = 3.3$):

$Ca > NH_4 > SO_4 > U, Mg, Na, Cl > NO_2, Th > NO_3 > K$.

Величина газово-аэрозольной нагрузки макроэлементов растворимой фазы снега колеблется в пределах от $0.n$ (Mg, S, K, Si, Al), n (Cl, N, Na) и $10n$ $mg/(m^2 \text{ сут})$ для S и Ca – основных компонентов зимних атмосферных выпадений. Величина нагрузки микроэлементов изменяется от $0.0n$ ($F, Ba, P, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr$) до минимальных значений $0.00000n$ (Be, Ag, Tl, Th, Pt, Au) $mg/(m^2 \text{ сут})$.

На долю макрокомпонентов и соединений азота приходится 90–95% от общего объема газово-аэрозольных продуктов выпадений. Соотношение макрокомпонентов по величине плотности выпадений в пересчете на элемент $C > N > S$, показывает преобладание углерода, на долю которого приходится около 72% общего объема зимних выпадений. По средней концентрации и плотности атмосферных выпадений Якутск можно назвать “углеродным” городом.

Как в летней, так и в зимней приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии тяжелых металлов, редких, рассеянных и радиоактивных элементов. Изученные актиноиды формируют обширные мало контрастные ореолы в центральной части города – U или локальные точечные аномалии на его территории – Th (рис. 3).

Среднее содержание актиноидов в компонентах атмосферы и литосферы в районе Якутска представлено в табл. 3.

Наблюдается равномерное понижение концентрации Th и U в системе почвы–ВВ летние–ВВ зимние–аэрозоли и газы. В почвах, летних и зимних ВВ преобладает Th , в водной фазе снега содержание U становится на порядок выше, чем Th .

Величина коэффициента аэрозольной аккумуляции показывает, что при формировании аэрозолей концентрация актиноидов в ВВ понижается на один математический порядок по сравнению с аллювиальными почвами Центральной Якутии. Как U , так и Th , являются элементами с отрицательной интенсивностью аэрозольного обогащения. Пониженная концентрация Th и U в

Таблица 3. Среднее содержание актиноидов в компонентах окружающей среды, мг/кг

Природная среда	Th	U	Источники
Атмосфера			
Аэрозоли зима (снег), Якутск	0.6×10^{-5}	4.4×10^{-5}	Автор
ВВ зима (снег), Якутск	1.45	0.52	
ВВ лето, Якутск	5.5	1.54	
Литосфера			
Земная кора	13.0	2.5	Виноградов, 1962
Пески, песчаники	6.7	2.0	Григорьев, 2009
Почво-грунты, Центральная Якутия	7.3	1.72	Chevychelov, Sobakin, 2020
Почво-грунты, Туймаада	10.6	2.4	

Таблица 4. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы

Актиноиды	Статистические параметры	Летний период. Взвешенные вещества		Зимний период. Снег				Сумма выпадений мг/(м ² год)
		мг/(м ² сут)	%	пыль		аэрозоли, газы		
				мг/(м ² сут)	%	мг/(м ² сут)	%	мг/(м ² сут)
Th	$C_{\text{арифм}}$	0.233	89	0.028	11	0.9×10^{-7}	$n \times 10^{-7}$	46.5
	$C_{\text{макс}}$	0.934	95	0.053	5	0.3×10^{-6}	$n \times 10^{-6}$	169
U	$C_{\text{арифм}}$	0.084	91	0.008	9	0.8×10^{-6}	$n \times 10^{-6}$	16.4
	$C_{\text{макс}}$	0.274	97	0.009	3	1.0×10^{-5}	$n \times 10^{-5}$	48

Примечания. Содержание: $C_{\text{макс}}$ – максимальное, $C_{\text{арифм}}$ – среднее арифметическое.

континентальных аэрозолях района обусловлена составом исходного материала – преимущественно песков, поступающих в тропосферу в качестве аэрозольных частиц.

Основная масса актиноидов – около 90% выпадает из атмосферы в теплый период года. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы в это время составляет в среднем Th = 0.233 мг/(м² сут), U = 0.084 мг/(м² сут) (отношение Th/U = 2.8) и достигает максимальных значений, соответственно, 0.934 и 0.274 мг/(м² сут).

На зимние твердые впадения ВВ (преимущественно фракция РМ₁₀) приходится около 10% от общей массы поступления актиноидов из атмосферы на территорию города. Ежесуточное поступление актиноидов из атмосферы в холодный период на порядок ниже, чем летом для Th и на два порядка для U (отношение Th/U = 3.5) и составляет: Th = 0.028, U = 0.008 мг/(м² сут).

С аэрозольными и газовыми выпадениями – растворимая фаза снега из зимней атмосферы поступают минимальные объемы актиноидов: в среднем Th = 0.9×10^{-7} и U = 8×10^{-7} мг/(м² сут) (табл. 4).

В аэрозольно-газовых выпадениях концентрация U преобладает (отношение Th/U = 0.11) благодаря высокой миграционной способности этого элемента (Евсеева и др., 1974).

Общий объем атмосферного поступления актиноидов на территорию города оценивается

цифрой около 63 мг/м² год, 2/3 которой составляет Th. На участках контрастных аномалий эта величина может возрасти более чем в три раза, достигая 217 мг/м² год, основная часть которой также представлена Th.

Суммарное выпадение актиноидов на территорию города составляет примерно $n \times 10^{-3}\%$ от общего годового объема загрязняющих веществ поступающих из атмосферы.

В почвы и грунты сезонного слоя (СТС) большая часть актиноидов поступает из атмосферы. Преимущественное поступление Th и U с пылевыми фракциями ВВ ограничивает их миграционную способность в основном поверхностью почв, в то время как присутствие этих металлов в растворимой фазе снежного покрова позволяет им, при таянии снега, проникать в более глубокие горизонты СТС, концентрируясь в надмерзлотных водах. Наблюдается взаимосвязь концентрации актиноидов в снежном покрове и в надмерзлотных водах СТС (рис. 4).

Способствуют подвижности U в грунтах СТС и надмерзлотных водах слабощелочные значения рН (7.2–7.7) и определенная открытость грунтов, окислительно-восстановительный потенциал которых в СТС равен в среднем 419 мВ.

Уровень загрязнения зимней атмосферы практически на всей территории города по суммарному показателю загрязнения снежного покрова оценивается как низкий и умеренно опасный в зонах

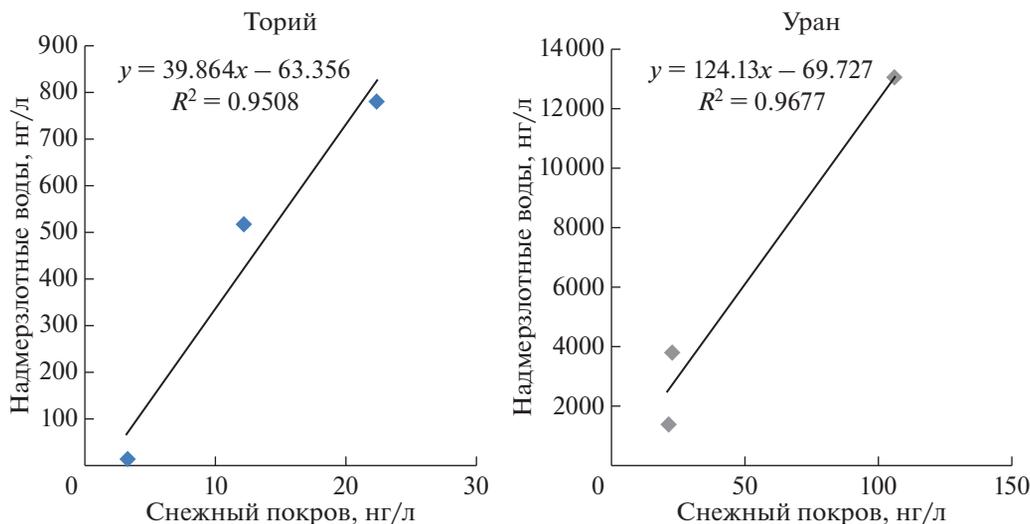


Рис. 4. Концентрация актиноидов в надмерзлотных водах и снежном покрове.

интенсивного движения транспорта и вблизи объектов энергетики, где содержание актиноидов превышает фоновые значения в 20–30 раз.

По сравнению с содержанием актиноидов в зимней атмосфере (в растворимой фазе снежного покрова) ряда городов Восточной Сибири и Монголии (Благовещенск, Братск, Иркутск, Улан-Батор), для Якутска характерны значительно меньшие показатели (табл. 5).

Рассматриваемые населенные пункты расположены в восточной части страны, которая считается неблагоприятной для рассеивания вредных примесей. Во всех них, кроме Якутска, находятся крупные промышленные предприятия. Это города с высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха (Госдоклад, 2019). Несмотря на неблагоприятные природные факторы: геоморфологические – расположение города в котловине и климатические – направления ветров, температурная инверсия и длительные штили в зимний период, атмосфера Якутска менее насыщена актиноидами. Этому способ-

ствуют геологические условия – средние содержания Th и U в литогенной составляющей зоны гипергенеза и низкая техногенная нагрузка в зимний период, которая обеспечивается в основном автотранспортом, энергетические же предприятия работают на газе. Уровень накопления актиноидов в снежном покрове Якутска близок к показателям северной части озера Байкал, которая считается фоновым районом наименее затронутым техногенным воздействием (Ветров, Кузнецова, 1997). Уровень концентрации актиноидов в снежном покрове Якутска может рассматриваться как фоновый для крупного региона Восточной Сибири–Центральной Якутии, искаженный слабым техногенным воздействием городской инфраструктуры Якутска.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории города было проведено геохимическое изучение ВВ в летней и зимней (растворимой и твердой фазах снежного покрова) приземной атмосфере.

Таблица 5. Среднее содержание актиноидов в снежном покрове городов Восточной Сибири

Города	Содержание актиноидов				Источники
	Твердая фаза, мг/кг		Жидкая фаза, мкг/л		
	Th	U	Th	U	
Якутск (n = 80)	1.45	0.52	0.0076	0.068	Автор
Благовещенск (n = 33)	–	4.03	–	0.26	Радомская и др., 2019
Улан-Батор (n = 17)	166	96	20	70	Сорокина и др., 2013
Иркутск (n = 21)	–	–	0.010	0.040	Гребенщикова, 2013
Братск (n = 18)	–	–	0.013	0.017	
Байкал, северная часть (n = 7)	4	3	0.0037	0.030	Ветров, Кузнецова, 1997

Установлено, что в приземной атмосфере Якутска формируются техногенные геохимические аномалии тяжелых металлов, редких и радиоактивных элементов. Изученные актиноиды формируют обширные мало контрастные ореолы в центральной части города (U) и локальные точечные аномалии на его территории (Th).

ВВ в приземной летней атмосфере полидисперсны и представляют собой совокупность твердых частиц разного размера. В летней атмосфере Th и U концентрируются преимущественно в пылевой фракции ВВ (PM₁₀₋₁₀₀), в комплексе с группой сидерофильных элементов. Зимние ВВ более однородны по размерам частиц и в основном представлены фракцией PM₁₀.

Специфичными минеральными фазами ВВ коррелирующими с актиноидами, осевшими на почвенный покров в зоне техногенного воздействия, являются: для Th пироксены и амфиболы, для U карбонаты и амфиболы.

Концентрация Th и U равномерно понижается в системе: почвы—ВВ летние—ВВ зимние (снег)—аэрозоли и газы (снег). В почвах, летних и зимних ВВ преобладает Th, в аэрозольно-газовой составляющей, содержание U, благодаря высокой миграционной способности, становится на порядок выше, чем Th.

Основная масса актиноидов — около 90% выпадает из атмосферы в теплый период. На зимние твердые впадения ВВ приходится около 10% от общей массы поступления актиноидов из атмосферы на территорию города. С аэрозольными и газовыми выпадениями из зимней атмосферы на поверхность поступают минимальные объемы Th и U.

Общий объем атмосферного поступления актиноидов на территорию города составляет около 63 мг/м² год, 2/3 которого приходится на Th. На участках контрастных аномалий эта величина может возрастать до 200 мг/м² год, основная часть которой также представлена Th.

Основными источниками поступления актиноидов в приземную атмосферу Якутска являются пыление с поверхности почв и выбросы автотранспорта. В меньшей степени — выбросы объектов энергетики и стройиндустрии.

Поступление Th и U из атмосферы в миграционных аэрозольно-газовых формах (в растворимой фазе снежного покрова) позволяет актиноидам при таянии снега, проникать в поверхностные горизонты СТС, концентрируясь в надмерзлотных водах.

Уровень загрязнения зимней атмосферы практически на всей территории города по суммарному показателю загрязнения снежного покрова оценивается как низкий и умеренно опасный в зонах интенсивного движения транспорта и вблизи объектов энергетики.

Уровень концентрации актиноидов в снежном покрове Якутска может рассматриваться как фоновый для Центральной Якутии, искаженный слабым техногенным воздействием городской инфраструктуры Якутска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ветров В.А., Кузнецова А.И. (1997) *Микроэлементы в природных средах региона озера Байкал*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 234 с.
- Виноградов А.П. (1962) Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. *Геохимия*. (7), 555-571.
- Геология и полезные ископаемые России. Т. 3. *Восточная Сибирь* (2002). Спб.: ВСЕГЕИ, 396 с.
- Государственный доклад “О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году”. (2019) М.: Минприроды России; НПП “Кадастр”, 844 с.
- Государственный доклад об экологической ситуации в Республике Саха (Якутия) в 2019 г.: <https://minpriroda.sakha.gov.ru> (дата обращения: 15.02.2021).
- Гребенщикова В.И. (2013) Геохимическая специфика состава снеговой воды некоторых городов Иркутской области. *Вода: химия и экология*. (2), 19-25.
- Григорьев Н.А. (2009) *Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры*. Екатеринбург: УрО РАН, 382 с.
- Григорьев А.А., Будыко М.И. (1959) Классификация климатов СССР. *Известия АН СССР. Серия географическая*. (3), 3-19.
- Евсеева Л.С., Перельман А.И., Иванов К.Е. (1974) Геохимия урана в зоне гипергенеза. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 280 с.
- Макаров В.Н. (2016) Экогеохимия окружающей среды города, расположенного в криолитозоне (на примере Якутска). *Региональная экология*. 4(46), 7-21.
- Подъячев Б.П. (2009) Геохимические аномалии благородных металлов в осадочных отложениях Якутского поднятия. *Система коренной источник—россыпь*. Якутск: Изд-во ЯНЦ СО РАН, 166-173.
- Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.М., Сергеева А.Г., Бородин Н.А. (2018) Многомерный статистический анализ содержаний элементов в снеговом покрове г. Благовещенска. *Региональная экология*. 2(52), 15-28.
- Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П., Смирнова Р.С., Башаркевич И.Л., Онищенко Т.Л., Павлова Л.Н., Трефилова Н.Я., Ачкасов А.И., Саркисян С.Ш. (1990) *Геохимия окружающей среды*. М.: Недра, 335 с.
- Сорокина О.И., Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Голованов Д.Л., Бажа С.Н., Доржготов Д., Энх-Амгалан С. (2013) Тяжелые металлы в воздухе и снежном покрове Улан-Батора. *География и природные ресурсы*. (3), 159-170.
- Chevychelov A.P., Sobakin P.I. (2020) The Contents and Distributions of Natural Radionuclides ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K in Permafrost Soils of Central Yakutia. *J. Siberian Federal University. Biology*. 13(1), 109-123.
- Urban airborne particulate matter: origin, chemistry, fate and health impacts* (2011). Eds.: F. Zereini, C.L.S. Wiseman. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 656 p.