

УДК 504.3.054

МИНЕРАЛЬНО-ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ТВЕРДОГО ОСАДКА СНЕГОВОГО ПОКРОВА В РАЗЛИЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОНАХ Г. УСОЛЬЕ-СИБИРСКОЕ

Холодова Марина Сергеевна¹,
akimova@igc.irk.ru

Пастухов Михаил Владимирович¹,
mpast@igc.irk.ru

Бычинский Валерий Алексеевич¹,
val@igc.irk.ru

Просекин Сергей Николаевич^{1,2},
pros.sergey@igc.irk.ru

Белозерова Ольга Юрьевна¹,
obel@igc.irk.ru

¹ Институт геохимии им. Виноградова СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А.

² Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Актуальность изучения химического состава твердого осадка снегового покрова г. Усолье-Сибирского предопределили данные Минприроды России, приведенные в Государственном докладе «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации», которые показывают значительное ухудшение экологической обстановки в период с 2012 по 2017 гг. В 2020 г. Иркутская область заняла третье место среди регионов Сибири по промышленным выбросам в атмосферу. Отмечено пять самых загрязненных городов – Братск, Зима, Черемхово, Усолье-Сибирское и Шелехов, в которых, несмотря на применяемые в настоящее время более современные очистные сооружения, показатели загрязнения выросли по сравнению с предыдущим периодом. Особую актуальность работе придает тот факт, что на расстоянии всего 120 км от района исследования находится озеро Байкал – уникальный природный объект, отнесенный к Участкам Мирового Наследия. Река Ангара, вытекающая из оз. Байкал, – главный источник питьевой воды для населения прибрежных городов, протекает в непосредственной близости от зон сосредоточения промышленных производств.

Цель: оценка экологического состояния воздуха г. Усолье-Сибирское по результатам снегогеохимического мониторинга и геоинформационного картирования.

Объекты: твердый осадок снегового покрова г. Усолье-Сибирского Иркутской области.

Методы. Химический состав твердого осадка снегового покрова определяли методом ISP-MS, анализ ртути проведен методом атомной абсорбции на спектрометре «РА-915+», минеральный состав твердого осадка снега определен рентгено-спектральным электронно-зондовым микроанализом.

Результаты. Представлены результаты исследования минерального и микроэлементного составов твердого осадка снегового покрова в функциональных зонах г. Усолье-Сибирское. Идентифицированы химические элементы и минералы – маркеры техногенных источников загрязнения. С помощью ГИС выполнено картирование, результаты которого помогли выделить ореолы со слабой, средней и сильной степенью загрязнения.

Ключевые слова:

Загрязнение, микроэлементы, минеральный состав, снеговой покров, промышленная зона, фоновый район, Усолье-Сибирское.

Введение

В период стремительного развития мировой промышленности произошло значительное повышение техногенной эмиссии загрязняющих веществ в атмосферу. Воздушными потоками газообразные и твердые вещества распространяются на большие расстояния, достигая отдаленных от промышленных центров регионов мира [1]. Недавние исследования показали, что загрязнение атмосферного воздуха может существенно увеличивать риск развития у людей различных заболеваний, включая диабет и болезнь Альцгеймера [2–4]. В связи с этим особо актуальной экологической проблемой является контроль загрязнения атмосферного воздуха, выявление ореолов рассеивания и источников поступления потенциально токсич-

ных элементов, принятие мер по минимизации негативных воздействий на окружающую среду и живые организмы. Одним из наиболее объективных индикаторов загрязнения атмосферы в условиях Восточной Сибири является снеговой покров, осаждающий и аккумулирующий химические элементы различного генезиса. Снег является важным компонентом, участвующим в перераспределении загрязняющих веществ в наземных и водных экосистемах. Так, например, при снеготаянии часть элементов-загрязнителей поступает из снегового покрова в поверхностный слой подстилающих почв, другая часть включается в поверхностный сток, в значительной мере увеличивая их концентрации в ближайших водоемах и водотоках [5]. Ежегодная миграция твердых частиц, обогащен-

ных микроэлементами, из снегового покрова в почвы и донные отложения создает зоны повышенного загрязнения, это, в свою очередь, приводит к негативной трансформации среды обитания растений и животных, нарушению экологического равновесия и биоразнообразия [5–8]. Такие изменения наиболее характерны для территорий, прилегающих к крупным промышленным производствам. В Прибайкалье одним из наиболее загрязненных промышленных центров является г. Усолье-Сибирское, расположенный вдоль левого берега р. Ангары. Наибольший вклад в техногенное загрязнение г. Усолье-Сибирское вносит предприятие «Усольехимпром» (УХП), где с помощью метода ртутного электролиза производится продукция: хлор и каустическая сода. Таким образом, ртуть, которая на протяжении нескольких десятилетий в больших объемах поступала в окружающую среду, стала основным загрязнителем исследуемой территории. В данный момент предприятие УХП закрыто. Однако загрязняющие вещества, поступившие в течение 26 лет, продолжают воздействовать на окружающую среду. На территории города развита фармацевтическая (АО «Фармасинтез»), машиностроительная (завод ОАО ПО «Усольмаш» производство оборудования для горных работ) и мясоперерабатывающая промышленность (СХПК «Усольский свиноплекс») и топливно-энергетический комплекс (ТЭЦ-11). В научных публикациях [9–13] широко обсуждается проблема ртутного загрязнения основных компонентов окружающей среды, полученного в результате деятельности предприятия УХП, в то же время изучению минерально-вещественного состава как индикатора антропогенного загрязнения атмосферного воздуха города уделено недостаточно внимания. Поэтому существует необходимость получения таких данных для твердого осадка снегового покрова рассматриваемой территории. Изучение минерально-вещественного состава твердых аэрозолей важно для лучшего понимания путей миграции загрязнителей и определения степени их воздействия на биологические объекты, включая человека [14–16].

Цель данной работы состоит в изучении микроэлементного (V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Th, U, Hg) и минерально-вещественного составов твердого осадка снегового покрова техногенно нагруженного участка Прибайкалья – г. Усолье-Сибирское. Это позволит выявить особенности распространения элементов-загрязнителей, поступающих от разных источников, а также поможет разработать рекомендации по геоэкологическому мониторингу крупных промышленных центров.

Объекты и методы исследования

Всего за 2010–2020 гг. было отобрано 28 проб твердого осадка снегового покрова. Территория г. Усолье-Сибирское была условно поделена на две функциональные зоны – промышленная и селетевная (городская). Фоновый район – территория Южного Байкала, напротив п. Листвянка.

Промышленная зона, расположенная в западной части города, вытянута вдоль левобережья р. Ангары.

На её территории расположены производственные площадки – это заброшенная производственная площадка ООО «Усольехимпром» (УХП), Теплоэлектроцентральный (ТЭЦ-11), шламонакопитель (рис. 1). Шламонакопитель расположен в 2 км от р. Ангары и р. Белой. Согласно статистической отчетности УХП, объем накопленного шлама составляет 3,4 млн м³. В настоящее время водное зеркало, ранее покрывавшее всю площадь накопителя, отсутствует, что приводит к атмосферному переносу твердых ртутьсодержащих отходов. По территории г. Усолье-Сибирское протекают реки Белая и Ангара, которые используются жителями региона как основные источники питьевого и рыбохозяйственного назначения. Потенциальная опасность заключается в том, что высокотоксичные элементы с атмосферным переносом и поверхностным стоком поступают и в акватории рек. В настоящее время достоверные данные по содержанию ртути и других токсичных элементов, накопленных в шламонакопителе, а также в зоне его влияния, отсутствуют. Площадь УХП составляет 610 гектаров. На территории селетевной зоны г. Усолье-Сибирское площадью 74 тыс. га сосредоточены жилые дома, административные здания, объекты культуры.

Для сравнительной оценки загрязнения исследуемой территории в качестве фонового объекта выбрана акватория оз. Байкал, в наименьшей степени подверженная антропогенному воздействию. Отбор проб снегового покрова проводился на 6 станциях Южного Байкала, равномерно распределенных по трансекту между восточным и западным берегом от пос. Танхой до п. Листвянка (рис. 1). В качестве фоновых концентраций микроэлементов в работе использовались их медианные значения.

Снегогеохимическая съемка проводилась в конце зимнего периода, перед началом подтаивания (февраль–март), когда снег еще не начал гранулироваться. Отбор проб проводился с учетом розы ветров по общепринятой методике [17], методическим рекомендациям ИМГРЭ [18]. В среднем плотность отбора снегового покрова составляла одна проба на 1 км². Необходимый отбираемый объем (вес) пробы зависел от высоты снегового покрова. Пробы отбирались пластиковым совком (белого цвета). При этом особое внимание обращалось на отбор снегового покрова у земной поверхности (5 см над почвой) с целью исключения влияния почвенного покрова. Отобранные снеговые пробы доставлялись в лабораторию, до начала их обработки хранились в холодном неоттаиваемом помещении с температурой, исключающей таяние снега. Для подготовки пробы снеговой покров подлежал таянию при комнатной температуре, затем снеговую воду фильтровали через фильтр (синяя лента), а твердый осадок высушивали, просеивали через сито 0,8 мм и взвешивали до постоянного веса.

Все виды химического анализа проводили в Изотопно-геохимическом центре коллективного пользования Института геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН (ИГХ СО РАН). Микроэлементный анализ проб (Fe, Zn, Cd, Pb, Hg) проведен с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (ICP

MS Finnigan Element 2). Содержание ртути осуществлено методом атомной абсорбции на спектрометре «РА-915+» с приставкой «РП-91С». Минеральный состав изучен методом рентгеноспектрального электронно-зондового микроанализатора (РСМА) на микроанализаторе Superprobe JXA-8200 (JEOL Ltd, Япония). С помощью РСМА проанализировано 3 образца.

Проба, отобранная на территории промзоны г. Усолье-Сибирское, проба с парковой территории г. Усолье-Сибирское и проба с фоновой участка п. Листвянка (оз. Байкал). В ходе исследований была оценена неоднородность фазового минерального и химического состава исследуемого материала.

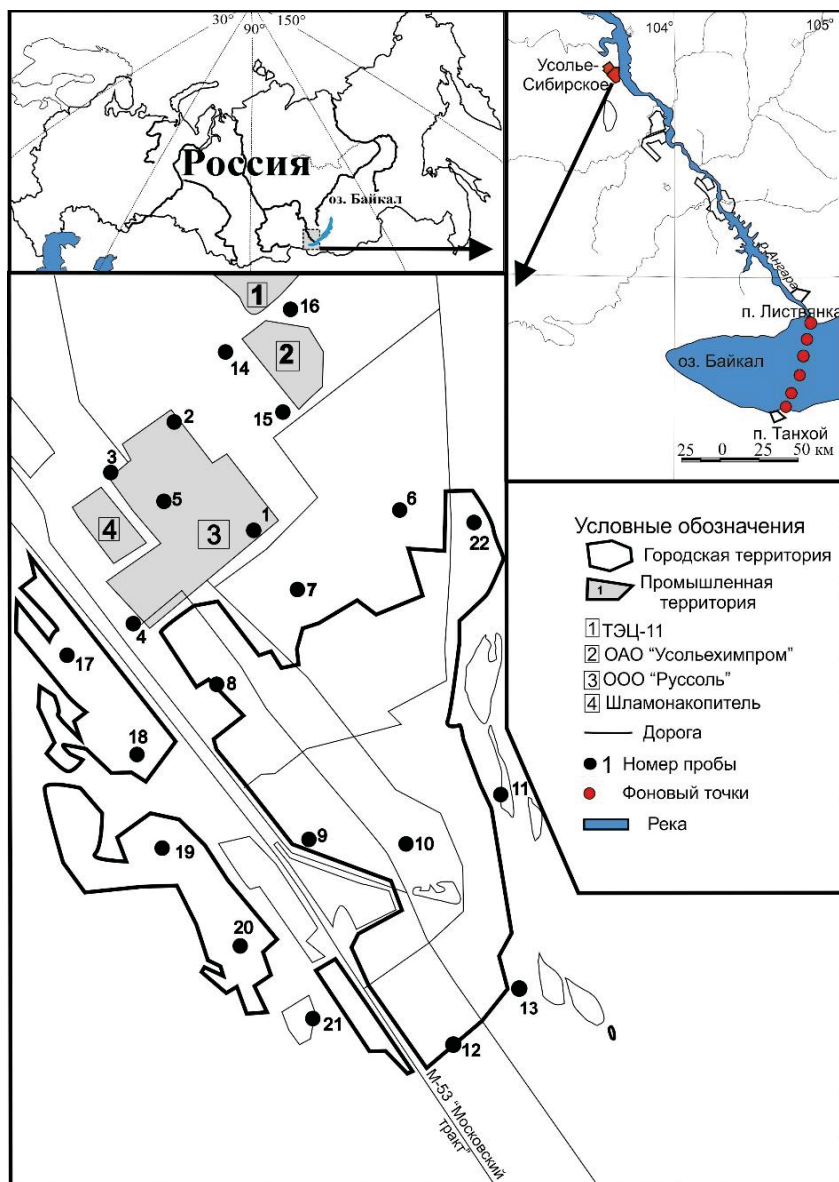


Рис. 1. Общая карта-схема расположения района исследования точек отробования снегового покрова г. Усолье-Сибирское

Fig. 1. General map-layout of the area under study of the testing snow cover points in Ussolye-Sibirskoe

Количественной мерой воздействия ряда элементов на окружающую среду служит Z_c – суммарный показатель загрязнения, который вычисляется по формуле:

$$Z_c = \sum_{i=1}^n K_c - (n - 1),$$

где K_c – коэффициент концентрации элемента; n – число учитываемых элементов с $K > 1$; коэффициент концентрации (K_c) рассчитывается:

$$K_c = C_i / C_f,$$

где C_i – содержание элемента в пробе; C_f – фоновое содержание.

Для обработки аналитических данных использовались программы Grapher и Microsoft Excel 2007. Для построения графиков, таблиц, карт использовались программы CorelDRAW X3, QGIS. Кластерный анализ выполнялся при помощи надстройки «Cluster» для Microsoft Excel. В данной надстройке есть возможность Q и R типа анализа. Благодаря этому удалось показать ассоциации элементов, характерных

для различных источников загрязнения, функционирующих на исследуемой территории.

Результаты и обсуждения исследования

Микроэлементный состав твердого осадка

Содержание тяжелых металлов снегового покрова г. Усолье-Сибирское представлено в табл. 1.

Таблица 1. Концентрации химических элементов в твердой фазе снегового покрова на территории г. Усолье-Сибирское по данным ISP-MS (мг/кг)

Table 1. Concentrations of chemical elements in the solid phase of snow cover on the territory of Ussolye-Sibirskoe according to ISP-MS data (mg/kg)

Элемент Element	Промышленная зона (n=13) Industrial zone (n=13)	Городская зона (n=9) Urban area (n=9)	Фон* (n=6) Background*
V	270±32	150±57	70
Mn	706±77	560±79	315,3
Fe	53226±47491	41994±20258	24111,9
Co	56±10	32±11	16,1
Ni	123±13	83±20	50
Cu	266±48	160±81	50
Zn	329±50	203±53	198,8
As	39±7	26±9	10,4
Cd	0,3±0,05	0,2±0,06	0,11
Pb	145±39	90±28	44,6
Th	33±5	21±9	12,3
U	14±2	9±4	3,1
Hg	0,6±0,1	0,3±0,08	0,02
Zc	129	68	–

Примечание: ± стандартное отклонение; * – фон п. Листвянка (оз. Байкал).

Note: ± standard deviation; * – background of Listvyanka village (Lake Baikal).

Построение для территории г. Усолье-Сибирское площадных моноэлементных карт (рис. 3) распределения микроэлементов в твердом осадке снегового покрова позволило выявить ореолы повышенных содержания элементов.

Концентрации Zn были максимальными на территории промышленной зоны УХП (табл. 1), при сравнении с городской зоной и фоном превышение составило 2 раза. Такое распределение Zn в снеговом покрове характерно для многих территорий, испытывающих влияние подобных промышленных производств. Так, например, в городах Улан-Батор, Чита, Благовещенск [19, 20] на территории промышленных зон, включающих теплоэлектро станции, комбинаты питания и т. д., отмечается повышение содержания Zn.

Природные же концентрации Zn в снеговом покрове других регионов заметно отличаются. Самые низкие концентрации Zn – в твердой фазе снегового покрова Антарктиды [21]. По данным [22] концентрация Zn на архипелаге Шпицберген, расположенном в Северном Ледовитом океане, достигает 31 мкг/л. Основной природный привнос Zn в твердом осадке снегового покрова поступает от почвенной пыли, со скальных поверхностей глинистых пород, песчанников, карбонатных и глинистых сланцев, которые переносятся на большие расстояния под дей-

ствием сильных ветров и конвективных процессов [23, 24].

В промышленной зоне г. Усолье-Сибирское в твердой фазе снегового покрова концентрации Hg превышают фоновые значения в 32 раза и достигают 0,8 мг/кг. Отчетливо наблюдается шлейф высоких концентраций Hg от места цеха ртутного электролиза в направлении к р. Ангаре. До закрытия основного предприятия УХП (2008 г.) концентрации Hg в твердом осадке снегового покрова составляли 33,4 мг/кг. А за весь период исследования с 2008 по 2020 гг. наблюдается снижение концентрации Hg в твердом осадке снегового покрова от 0,8 (2008 г.) до 0,4 мг/кг (2019 г.). В городской зоне концентрации Hg снижаются до 0,3 мг/кг, но тем не менее это выше фона на 0,02 мг/кг. Ртуть, обладающая широким спектром токсического воздействия на все живые организмы, признана чрезвычайно опасным загрязнителем окружающей среды.

Другим источником поступления Hg в атмосферу служат выбросы сжигания угля [25]. Очень часто наблюдается обогащение твердых аэрозолей Hg по сравнению с ее концентрациями в исходном топливе, причем чем меньше размеры частиц твердых аэрозолей, тем интенсивнее обогащение их Hg. Ртутьсодержащие аэрозоли установлены в продуктах сгорания, например, практически во всех стационарных источниках энергии США, на которых в качестве топлива используется уголь. Уровни содержания Hg в твердом аэрозоле варьируются в пределах 0,05–0,55 мг/кг [25–29].

Наиболее высокий уровень содержания Pb в твердом осадке снегового покрова обнаружен в промышленной зоне города (145±39 мг/кг) в непосредственной близости к шламонакопителю УХП. Содержание Pb в твердом осадке снегового покрова на фоновой территории составило 44 мг/кг. Очевидно, что геохимические аномалии Pb, выявленные в пределах промышленной зоны, в значительной мере обусловлены наличием на территории шламонакопителя и работой автотранспорта [30].

Распределение V в твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское показывает, что его основная масса равномерно рассеивается по центральной части города. Результаты анализа показали, что в центре города в твердом осадке снегового покрова содержания V в среднем составляют 150–250 мг/кг, а на и окраинах города снижаются до 77 мг/кг. Такое распределение, возможно, связано с особенностями распределения воздушного потока в условиях города. В результате возникают местные конвективные восходящие и нисходящие потоки. Наиболее теплой является центральная часть города. Повышение температуры здесь вызывает подъем теплого воздуха, на смену которому с окраин втягивается более прохладный. Это приводит к загрязнению центральности части города, где застройка плотная, скорость ветра меньше, чем на окраинах [31]. Загрязнение атмосферы V происходит при сжигании твердого и жидкого топлива [32]. В качестве топлива на ТЭЦ-11 используют уголь и мазут. Уголь содержит в себе незначительные концентрации V и его соединений в качестве

включений, которые при сжигании вместе с золой попадают в атмосферный воздух. Расход мазута зависит от качества угля, его применяют для обеспечения непрерывного процесса горения. По данным [33] в состав мазутной золы входит до 43 % оксида ванадия V_2O_5 .

Наибольший уровень содержания U (до 18 мг/кг) в твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское зафиксирован на территории промышленной зоны (рис. 2). Распределение Th (до 43 мг/кг) в снеговом покрове города фактически аналогично картине распределения U: максимальные значения радионуклида отмечаются также на территории промышленной зоны. Превышения концентрации U по сравнению с природным фоном – 6 раз, Th – 3 раза. Результаты исследований [34] показали, что уголь и зола Забитуйского месторождения обогащены радиоактивными элементами.

Площадь загрязнения снегового покрова изучаемой территории As составляет более 60 %. Наиболее высокие его концентрации установлены на территории промышленной зоны и изменялись от 28 до 52 мг/кг. В твердом осадке снегового покрова, отобранного вблизи ТЭЦ, концентрация As выше в 5 раз, чем в пробах с территории фонового района. Угли содержат 2,9 мг/кг As в форме арсенопирита, или примеси пирита. В процессе сжигания углей As переходит в газообразную форму или может находиться в виде частиц аэрозоля субмикронного размера. В процессе взаимодействия As с Ca образуется порошковое соединение арсенат кальция. При сжигании углей также образуются такие соединения, как As_2O_3 и арсенаты железа [35].

Одним из главных показателей загрязнения снегового покрова является коэффициент концентрации элементов (Kc). Исходя из полученного набора Kc элементов, поступающих в атмосферу с пылегазовыми выбросами расположенных на данных территориях предприятий, можно выстроить следующий ряд ранжирования по убыванию: Hg (30) > Cu (5,3) > U (4,6) > V (3,8) > As (3,7) > Co (3,5) > Pb (3,2) > Cd (2,7) > Th (2,7) > Ni (2,4) > Mn (2,2) > Fe (2) > Zn (1). Формирование данной группы элементов связано с влиянием заброшенной промплощадки УХП, в поч-

вогрунтах и шламонакопителе которой сосредоточены большие объемы промышленных отходов, представляющих серьезную угрозу для экологического благополучия всей окружающей среды Прибайкалья.

При исследовании твердого осадка снегового покрова территории г. Усолье-Сибирское большое значение имеет полиэлементный состав проб, который характеризуется с помощью суммарного показателя загрязнения (Zc) (табл. 1).

Распределение суммарного показателя загрязнения снегового покрова закономерное: для промышленной зоны г. Усолье-Сибирское значения показателя соответствуют высокой (128–256) степени загрязнения [36]. Наибольший вклад в суммарный показатель загрязнения вносят Hg, As, Pb, Zn, Fe. Расчет суммарного показателя загрязнения на селитебной территории г. Усолье-Сибирское соответствует средней (64–128) степени загрязнения.

С помощью показателя Zc, без проведения предварительной корреляционной оценки довольно сложно оценить, к какому источнику загрязнения относится та или иная группа элементов. Благодаря корреляционному анализу удалось показать ассоциации элементов, характерных для различных источников загрязнения, функционирующих на исследуемой территории.

Корреляционный анализ микроэлементного состава (рис. 2, Кластер R) показал, что концентрации V, U, Th, Cu, As тесно взаимосвязаны ($r=0,88-1$). Это указывает на общий источник их поступления. Заметно меньшую корреляционную связь имеют Co, Cd, Ni, Zn, Pb ($r=0,2-0,4$), в то время как содержание Fe, Mn и Hg, стоящих в кластере отдельно от остальной группы элементов, не имеет выраженной взаимосвязи с другими группами элементов ($r=0,2-0,4$). В твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское по результатам кластерного анализа наблюдается тесная взаимосвязь между пробами (рис. 2, Кластер Q). Таким образом, сформировались три основные группы. Все это указывает на выраженную специфичность поступления потенциально токсичных элементов в атмосферный воздух города с разными типами производств.

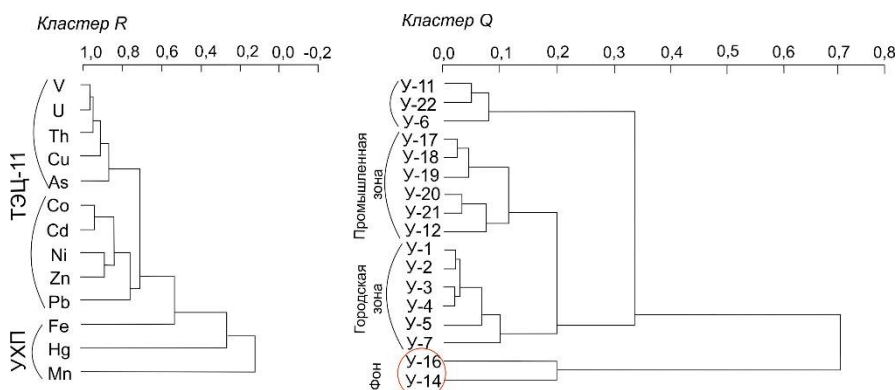


Рис. 2. Дендрограмма кластерного анализа химического состава твердого осадка снегового покрова г. Усолье-Сибирское

Fig. 2. Dendrogram of cluster analysis of the chemical composition of solid sediment in snow cover of Usolye-Sibirskoe

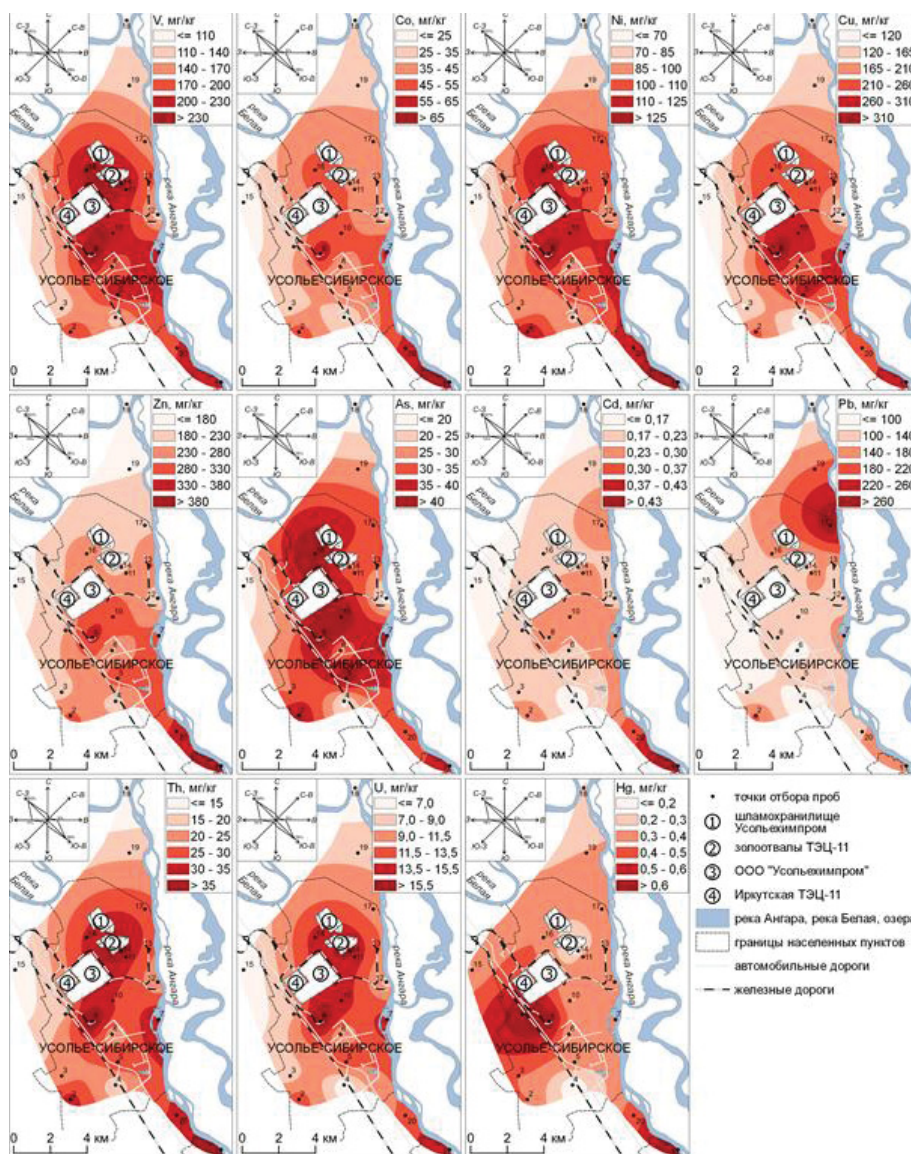


Рис. 3. Карты распределения микроэлементов в твердом осадке снегового покрова г. Усолье-Сибирское (мг/кг)
Fig. 3. Maps of distribution of trace elements in solid sediment of snow cover of Usolye-Sibirskoe (mg/kg)

Минеральный состав твердого осадка

По результатам исследования минерального состава методом РСМА твердый осадок представляет собой смесь частиц и их конгломератов различной формы, цвета и размеров. Наибольшее количество частиц мелкодисперсной фракции (от 1–10 мкм) обнаружено в пробе, отобранной вблизи промзоны города, причем их доля по объему составляет 30 % пробы (рис. 3). Количество частиц мелкодисперсной фракции гораздо меньше на территории города, но они тоже присутствуют. На территории фонового участка частиц с размером менее 10 мкм практически не обнаружено, преобладают частицы размером от 10 до 50 мкм (их объемная доля 70 %). Это говорит о том, что в такой пробе очень много частиц природного происхождения. Источниками таких частиц являются обнаженные почвы, скальные образования (рис. 5).

С помощью метода РСМА в твердом осадке снеговых проб, отобранных на территории г. Усолье-

Сибирское и п. Листвянка, были идентифицированы следующие типы техногенных частиц.

Металлические сферулы (рис. 4, а). Это частицы круглой формы с металлическим блеском черного, темно-серого цвета. Состав их преимущественно железистый, диаметр составляет от 0,5 до 10 мкм. На территории промзоны и ТЭЦ г. Усолье-Сибирское была обнаружена большая часть частиц округлой формы – металлические сферулы. Рядом авторов показано их техногенное происхождение [37].

Металлические сферулы являются составляющими компонентами золы уноса тепловых электростанций, которые работают на угле. Сферулы образуются в высокотемпературных процессах. Подробный механизм происхождения сферул рассмотрен в работах Л.Я. Кизильштейна [38, 39]. Округлые частицы могут легко переноситься с воздушными потоками на большие расстояния, так, например, такие частицы обнаружены в удаленном от промышленных зон районе – атмосфере Арктики [40].

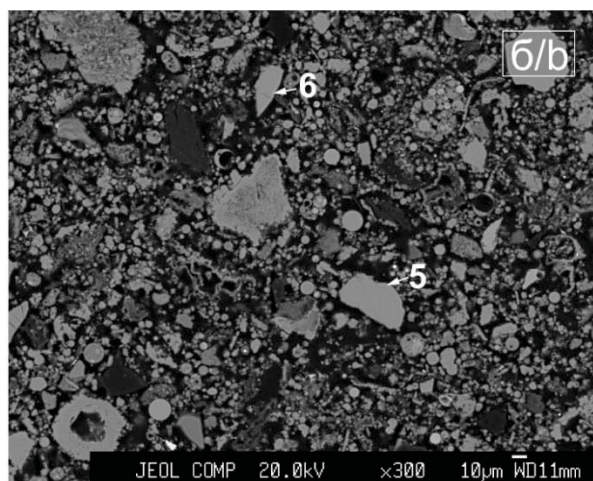
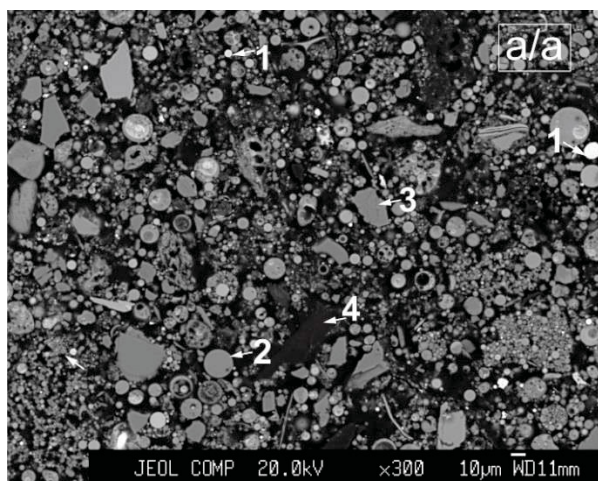


Рис. 4. Вид твердого осадка снежного покрова, отобранного на промышленной зоне г. Усолье-Сибирское (а) и в районе городской зоны (б). Изображение в обратно рассеянных электронах. Увеличение 300×. 1 – металлические сферулы ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ с примесями Fe, Ti), 2 – алюмосиликатные микросферулы, муллит (Fe_2O_3), 3 – кальцит и доломит ($CaCO_3$, $CaMgCO_3$), 4 – сажистая фаза, уголь (C), 5 – кварц (SiO_2)

Fig. 4. Type of solid snow cover sediment sampled in the industrial zone of Ussolye-Sibirskoe (a) and in the area of the urban zone (b). Image in backscattered electrons. Magnification 300×. 1 – metallic spherules ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ with Fe, Ti impurities), 2 – aluminosilicate microspherules, mullite (Fe_2O_3), 3 – calcite and dolomite ($CaCO_3$, $CaMgCO_3$), 4 – carbon black, coal (C), 5 – quartz (SiO_2)

Сферические частицы белого цвета – муллит (рис. 4, а). Диаметр частиц от 5 до 15 мкм. Их основа Si и Al с небольшим содержанием Fe, Ti, Ca и других элементов. Муллит является важным компонентом искусственных техногенных продуктов. Образуется при нагревании каолинита, глинозема, кокса до 950 °С. Сферические частицы муллита явно техногенного происхождения. Вероятнее всего, источником поступления таких частиц на территории г. Усолье-Сибирское, являются выбросы ТЭЦ-11, а также предприятия металлообработки.

Частицы сажи и угля – это частицы черного цвета, плоской формы (рис. 4, а). Состав частиц углеродный. Размер частиц изменяется от 3 до 40 мкм. Присутствие таких частиц в пробе является характерным признаком наличия вблизи ТЭЦ.

Частицы природного происхождения:

Кварц – серые, светло-серые частицы, не окатанные, размером от 2 до 25 мкм (рис. 4, б; рис. 5), присутствуют в большом количестве в пробах, отобранных в фоновых районах. Кварц (SiO_2) входит в состав силикатов. Крупные зерна кварца, как правило, имеют матовую поверхность, не окатанные, что свидетельствует об их эоловой обработке, т. е. материал, принесенный ветровым потоком.

Мусковит – среднего размера частицы (рис. 5) ($KAl_2[AiSi_3O_{10}][OH]_2$), калиевая слюда. В составе мусковита К находится в соотношении 11,8 %, Al – 39 %, Si – 45,2 %, а H_2O – 4,5 %. Частицы отличаются своей слоистой структурой, которая больше похожа на чешуйки либо на листовую пластину разной формы и размера.

Кальциты и доломиты ($CaCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$) (рис. 4, б) – частицы серого цвета, ограненной формы, размеры до 20 мкм. Необходимо отметить, что в образце, взятом на промплощадке г. Усолье-Сибирское,

выделяется достаточно много кальцита. Кальцит и доломит содержатся в карбонатных породах, которые слагают данную местность. Также на территории города находятся карьеры со щебнем.

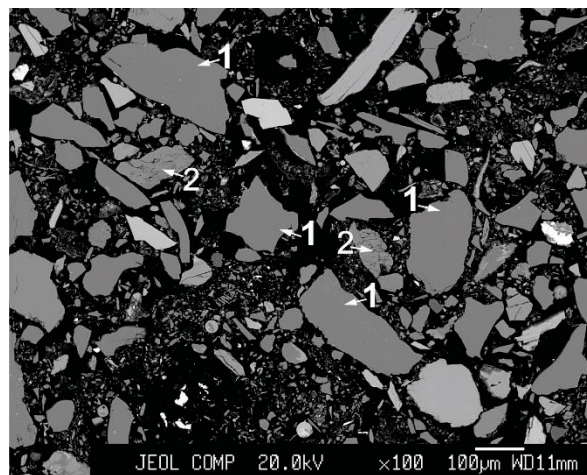


Рис. 5. Вид твердого осадка снежного покрова, отобранного на территории фоновой участка (п. Листвянка, оз. Байкал). Изображение в обратно рассеянных электронах. Увеличение 60×. 1 – кварц (SiO_2), 2 – мусковит ($KAl_2[AiSi_3O_{10}][OH]_2$)

Fig. 5. View of the solid sediment of snow cover selected on the territory of the background area (Listivyanka village, Lake Baikal). Image in backscattered electrons. Magnification 60×. 1 – quartz (SiO_2), 2 – muscovite ($KAl_2[AiSi_3O_{10}][OH]_2$)

Минерально-вещественный состав твердого осадка снежного покрова различных по техногенной нагрузке зон отбора проб приведен в табл. 2.

Таблица 2. Минерально-вещественный состав твердого осадка снежного покрова г. Усолье-Сибирское
Table 2. Mineral and material composition of solid sediment of snow cover of Ussolye-Sibirskoe

Зоны Zones	Минерал, частица Mineral, particle	Агрегат Unit	Химическая формула, состав Chemical formula, composition	Генезис Genesis
Фон, Городская зона Background, Urban area	Кварц/Quartz	Идиоморфные частицы Idiomorphic particles	SiO ₄	Природный Natural
	Полевой шпат/Feldspar	Призмы/Prisms	Na[Al ₃ O ₈]-Ca[Al ₂ Si ₂ O ₈]	
	Слоистые алюмосиликаты (мусковит, биотит) Layered aluminosilicates (muscovite, biotite)	Пластинки и чешуйки Plates and scales	K(Mg,Fe) ₃ [Si ₃ AlO ₁₀][OH,F] ₂ и др.	
	Кальцит, доломит Calcite, dolomite	Призмы, пластинки Prisms, plates	CaCO ₃ , CaMg(CO ₃) ₂	
	Сульфаты/Sulfates	Мелкие кристаллы Small crystals	[SO] ²⁻ ₄	
Промышленная зона Industrial zone	Муллит/Mullit	Сферулы белого цвета White spherules	3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ примесями Fe, Ti (Fe, Mg)·Fe ₂ O ₄	Техноген- ный Technogenic
	Гематит/Hematite	Сферулы черного, серого цвета Black, gray spherules	(Fe, Mg)·Fe ₂ O ₄	
	Сажистая фаза/Soot	Чешуйки/Scales	C	

Заключение

Проведено комплексное изучение твердого осадка снежного покрова различных функциональных зон г. Усолье-Сибирское для определения источников поступления и миграционных путей химических элементов техногенного происхождения. Основными источниками загрязнения территории г. Усолье-Сибирское являются предприятие УХП и ТЭЦ. Наиболее контрастные аномалии в промышленной зоне города образуют Hg, Cu, V, As. Особая опасность заключается в том, что высокотоксичные элементы с атмосферным переносом поступают на территорию г. Усолье-Сибирское и в акватории рек Белая и Ангара, которые используются жителями региона как основные источники питьевого и рыбохозяйственного назначения. Величина Zc ряда элементов (V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Pb, Th, U, Hg) в твердой фазе снежного покрова свидетельствует о высокой степени загрязнении атмосферы промышленной зоны г. Усолье-Сибирское. Применение корреляционного анализа позволило выявить ассоциации элементов, характерных для представленных источников загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Contaminant emissions as indicators of chemical elements in the snow along a latitudinal gradient in southern Andes / J. Pizarro, P. Vergara, S. Cerda, R.R. Cordero, X. Castillo, P. Rowe, G. Casassa, J. Carrasco, A. Damiani, P. Llanillo, F. Lambert, R. Rondanelli, N. Huneus, F. Fernandez, J. Alfonso, S. Neshyba // Scientific Reports. – 2021. – № 14530. – P. 1–10.
- Trace element distribution in the snow cover of different functional zones in Berezniki-Solikamsk industrial hub, Russia / E. Ushakova, E. Menshikov, T. Karavaeva, A. Puzik // Journal of Ecological Engineering. – 2021. – № 22 (10). – P. 28–39.
- Magnetite pollution nanoparticles in the human brain / B.A. Maher, I.A.M. Ahmed, V. Karloukovski, D.A. MacLaren, P.G. Foulds, D. Allsop, L. Calderon-Garciduenas // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2016. – V. 113 (39). – P. 10797–10801.
- Mazidi M., Speakman J.R. Ambient particulate air pollution (PM_{2.5}) is associated with the ratio of type 2 diabetes to obesity // Scientific Reports. – 2017. – V. 7 (1). – P. 1–7.
- Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015 / A.J. Cohen, M. Brauer,

Проведенный минерально-вещественный анализ твердого осадка снежного покрова на промышленной территории г. Усолье-Сибирское позволил установить четкие признаки техногенной нагрузки. Основная доля техногенного материала представлена в виде муллита, сажистых частиц и гематита. Природная составляющая твердого осадка снежного покрова исследуемой территории представлена в основном частицами кварца, полевым шпатом, мусковитом, биотитом.

Полученные результаты исследования минерально-вещественного состава твердого осадка снежного покрова различных зон г. Усолье-Сибирское могут быть использованы для прогнозирования техногенного воздействия на окружающую среду, совершенствования методов экологического мониторинга, решения задач численного моделирования процессов переноса твердого осадка на локальном и региональном уровнях, а также для изучения оценки риска здоровью населения.

Статья была выполнена в соответствии с Государственным заданием Института геохимии им. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук (проект № 0284-2021-0003).

- R. Burnett, H.R. Anderson, J. Frostad, K. Estep, M.H. Forouzanfar // Lancet. – 2017. – № 389 (10082). – P. 1907–1918.
- Трифонов К.И., Девисилов В.А. Физико-химические процессы в техносфере. – М.: Форум: ИНФРА-М, 2007. – 240 с.
- Добровольский В.В. Основы биогеохимии. – М.: Академия, 2003. – 400 с.
- Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change / R.A. Silva, J. West, Y. Zhang, S. Anenberg, J.-F. Lamarque, D. Shindell, W. Collins, S. Dalsoren, G. Faluvegi, G.A. Folberth, L.W. Horowitz, T. Nagashima, V. Naik, S. Rumbold, R.B. Skeie, K. Sudo, T. Takemura, D. Bergmann, Ph. Cameron-Smith, I. Cionni, R.M. Doherty, V. Eyring, B. Josse, I.A. MacKenzie, D. Plummer, M. Righi, D. Stevenson, S. Strode, S. Szopa, G. Zeng // Environmental Research Letters – 2013. – V. 8. – № 3. – P. 1–11.
- Correlation of natural and technogenic mercury sources in the Baikal polygon / P.V. Koval, G.V. Kalmychko, V.F. Geletya, G.A. Leonova, V.I. Medvedev, L.D. Andrulaitisa // Journal of Geochemical Exploration. – 1999. – V. 66. – P. 277–289.
- Антропогенная компонента и баланс ртути в экосистеме братского водохранилища / П.В. Коваль, Г.В. Калмычков, С.М. Лав-

- ров, Ю.Н. Удодов, Е.В. Бутаков, Ф.В. Файфилд, В.И. Алиева // Доклады Академии наук. – 2003. – Т. 388. – № 2. – С. 225–227.
11. Разработка технологии очистки поверхностного стока предприятия «Усольехимпром» (Южное Прибайкалье) / Е.А. Рущ, П.В. Коваль, Ю.Н. Удодов, Г.П. Королева, А.Е. Гапон, Л.Д. Андрулайтис // Инженерная экология. – 2007. – № 5. – С. 3–15.
 12. Особенности техногенного загрязнения и формы переноса ртуть в Братском водохранилище / В.И. Алиева, Е.В. Бутаков, М.В. Пастухов, Л.Д. Андрулайтис // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2011. – № 5. – С. 431–438.
 13. Gordeeva O.N., Belogolova G.A., Pastukhov M.V. Mercury speciation and mobility in soils of industrial areas in the Baikal region, southern Siberia // Environmental Earth Sciences. – 2017. – V. 76. – № 16. – P. 1–10.
 14. Song F., Gao Y. Size distributions of trace elements associated with ambient particulate matter in the affinity of a major highway in the New Jersey–New York metropolitan area // Atmospheric environment. – 2011. – V. 45. – P. 6714–6723.
 15. World Health Organization. Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2012 – Summary of Results. – Geneva, Switzerland: WHO, 2014. – 30 p.
 16. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city / E. Konstantinova, T. Minkina, A. Konstantinov, S. Sushkova, E. Antonenko, A. Kurasova, S. Loiko // Environmental Geochemistry and Health. – 2020. – V. 44. – № 2. – P. 409–432.
 17. Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 182 с.
 18. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве / Б.А. Ревич, Ю.Е. Саг, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1990. – 8 с.
 19. Эколого-геохимическая оценка аэротехногенного загрязнения урбанизированной территории по состоянию снежного покрова / Н.Г. Куимова, А.Г. Сергеева, Л.П. Шумилова, Л.М. Павлова, И.Г. Борисова // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2012. – № 5. – С. 422–435.
 20. Тяжелые металлы в воздухе и снежном покрове Улан-Батора / О.И. Сорокина, Н.Е. Кошелева, Н.С. Касимов, Д.Л. Голованов, С.Н. Бажа, Д. Доржготов, С. Энх-амгалан // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 159–170.
 21. Семенец Е.С., Свистов В.П., Тапаш А.С. Химический состав атмосферных осадков Российского Заполярья // Известия Томского университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 27–36.
 22. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasoline-powered vehicles / Y. Nazarenko, S. Fournier, U. Kurien, R.B. Rangel-Alvarado, O. Nepotchatykh, P. Seers, P.A. Ariya // Environmental Pollution. – 2017. – V. 223. – P. 665–675.
 23. Романовская А.Ю., Савин И.Ю. Аэрозольная пыль почвенного происхождения в атмосфере: источники, количество, свойства (обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. – 2021. – Вып. 109. – С. 36–95.
 24. Атмосферные взвеси Петропавловска-Камчатского по данным загрязнения снежного покрова: экологический анализ / К.С. Голохваст, В.В. Жаков, П.А. Никифоров, В.В. Чайка, Т.Ю. Романова, А.А. Карабцов // БЮЛЛЕТЕНЬ. – 2014. – Вып. 53. – С. 89–94.
 25. Jenny A., Fisher F., Nelson P. Atmospheric mercury in Australia: recent findings and future research needs Recent findings and future research needs // Element Science Anthropocene. – 2020. – V. 3 – P. 11623–11636.
 26. Tracing the transboundary transport of mercury to the tibetan plateau using atmospheric mercury isotopes / Ben Yu, Lin Yang, Hongwei Liu, Cailing Xiao, Duo Bu, Qiangying Zhang Jianjie Fu, Qiangong Zhang, Zhiyuan Cong, Yong Liang, Ligang Hu Yongguang Yin, Jianbo Shi, and Guibin Jiang // Environmental Science & Technology. – 2022. – № 56, 3. – P. 1568–1577.
 27. Improved mechanistic model of the atmospheric redox chemistry of mercury / V. Shah, D.J. Jacob, C.P. Thackray, Xuan Wang, E.M. Sunderland, Th.S. Dibble, A. Saiz-Lopez, I. Černušák, V. Kellö, P.J. Castro, R. Wu, Ch. Wang // Environmental Science & Technology. – 2021. – V. 55 (21). – P. 14445–14456.
 28. Chemical and mineral characteristics of melted snow-water in the Jilin Province, North-East China / X. Zhao, X. Guo, Y. Mao, H. Yan, M. Li, L. Zhao // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2016. – V. 6. – P. 1–9.
 29. Characteristic contaminants in snowpack and snowmelt surface runoff from different functional areas in Beijing, China / D. Yuan, Y. Liu, X. Guo, J. Liu // Environmental Science and Pollution Research. – 2018. – 25. – P. 36256–36266.
 30. Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity / O. Ramirez, A.M. Sánchez de la Campa, F. Amato, T. Moreno, L.F. Silva, J.D. de la Rosa // Science of The Total Environment. – 2019. – 652. – P. 434–446.
 31. Ukraintseva A.V., Plyusnina A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia) // Applied Geochemistry. – 2020. – V. 122. – P. 15–25.
 32. Иваницкий М.С. Анализ влияния характеристик и условий сжигания мазутных топлив на выход пентаоксида ванадия // Вестник МЭИ. Энергетика. – 2017. – № 1. – С. 20–24.
 33. Микроэлементы в углях восточной Сибири / Н.Г. Вязова, Л.П. Шаулина, А.Ф. Шмидт, Л.М. Димова // Химия твердого топлива. – 2016. – № 5. – С. 45–55.
 34. Арбузов С.И. Геохимия редких элементов в углях Сибири. – Томск: ИД «Д-Принт», 2007. – 468 с.
 35. Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Загрязнение территории Челябинска и его окрестностей мышьяком при сжигании угля // Химия твердого топлива. – 2011. – № 3. – С. 58–60.
 36. Ломоносов И.С., Макаров В.Н., Хаустов А.П. Экогеохимия городов Восточной Сибири. – Якутск: Изд-во СО РАН, Ин-т мерзлотоведения, 1993. – 107 с.
 37. Mercury pollution In snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia) / A.V. Talovskaya, E.G. Yazikov, N.A. Osipova, E.E. Lyapina, V.V. Litay, G. Metreveli, J. Kim // Geography, Environment, Sustainability. – 2019. – № 12. – P. 132–147.
 38. Кизильштейн Л.Я., Левченко С.В. Элементы-примеси и экологические проблемы угольной энергетики // Теплоэнергетика. – 2003. – № 12. – С. 14–19.
 39. Кизильштейн Л.Я. Элементы-примеси в дымовых выбросах угольных ТЭС Энергия: экономика, техника, экология. – 2017. – № 6. – С. 32–36.
 40. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики / В.П. Шевченко, А.П. Лисицын, Р.Р. Штайн (Stein), Н.В. Горюнова, А.А. Клювиткин, М.Д. Кравчишина, М. Кривс (Kriews), А.Н. Новигатский, В.Т. Соколов, А.С. Филиппов, Х.С. Хаас (Haas) // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2007. – № 1. – (75). – С. 106–118.

Поступила 15.06.2022 г.

Информация об авторах

Холодова М.С., младший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

Пастухов М.В., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

Бычинский В.А., кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

Просекин С.Н., младший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН; младший научный сотрудник Иркутского национального исследовательского технического университета.

Белозерова О.Ю., кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института геохимии им. Виноградова СО РАН.

UDC 504.3.054

MINERAL AND MATERIAL COMPOSITION OF SOLID SEDIMENT OF SNOW COVER IN VARIOUS FUNCTIONAL ZONES OF USOLYE-SIBIRSKOE

Marina S. Kholodova¹,
akimova@igc.irk.ru

Mikhail V. Pastukhov¹,
mpast@igc.irk.ru

Valery A. Bychinsky¹,
val@igc.irk.ru

Sergey N. Prosekin^{1,2},
pros.sergey@igc.irk.ru

Olga Yu. Belozeroва¹,
obel@igc.irk.ru

¹ Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS,
1A, Favorsky street, Irkutsk, 664033, Russia.

² Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov street, Irkutsk, 664074, Russia.

The relevance of studying chemical composition of solid sediment in snow cover of Usolye-Sibirskoe was predetermined by the data of the Ministry of Natural Resources of Russia, given in the State Report «On the State and Environmental Protection of the Russian Federation», which show a significant deterioration of the environmental situation in the period from 2012 to 2017. In 2020 Irkutsk Region took the third place among the regions of Siberia in terms of industrial emissions into the atmosphere. Five of the most polluted cities – Bratsk, Zima, Cheremkhovo, Usolye-Sibirskoe and Shelekhov – were noted, in which, despite more modern treatment facilities currently used, pollution indicators increased compared. The work is particularly relevant due to the fact that Lake Baikal – a unique natural object classified as a World Heritage Site – is located at a distance of only 120 km from the research area. The Angara River flowing from the lake Baikal, the main source of drinking water for the population of coastal cities, flows in close proximity to industrial production areas.

Objective: assessment of the ecological state of the air in Usolye-Sibirskoe based on the results of snow-geochemical monitoring and geoinformation mapping.

Objects: solid sediment of snow cover in Usolye-Sibirskoe, Irkutsk region.

Methods. Chemical composition of the solid sediment of the snow cover was determined by the ISP-MS method, mercury was analyzed by atomic absorption on the RA-915+ spectrometer, and the mineral composition of the solid snow sediment was determined by X-ray spectral electron probe microanalysis.

Results. The paper presents the results of studies of mineral and microelement compositions of solid sediment of snow cover in the functional zones of Usolye-Sibirskoe. Chemical elements and minerals – markers of technogenic sources of pollution – have been identified. With the help of GIS, mapping was performed, the results of which helped to identify halos with a weak, medium and strong degree of contamination.

Key words:

Pollution, trace elements, mineral composition, snow cover, industrial zone, background area, Usolye-Sibirskoe.

The research was carried out according to the State assignment of the Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS (project no. 0284-2021-0003).

REFERENCES

1. Pizarro J., Vergara P., Cerda S., Cordero R.R., Castillo X., Rowe P.M., Casassa G., Carrasco J., Damiani A., Llanillo P., Lambert F., Rondanelli R., Huneeus N., Fernandez F., Alfonso J., Neshyba S. Contaminant emissions as indicators of chemical elements in the snow along a latitudinal gradient in southern Andes. *Scientific Reports*, 2021, no. 14530, pp. 1–10.
2. Ushakova E., Meshnikov E., Karavaeva T., Puzik A. Trace element distribution in the snow cover of different functional zones in Berezniki-Solikamsk Industrial Hub, Russia. *Journal of Ecological Engineering*, 2021, no. 22 (10), pp. 28–39.
3. Maher B.A., Ahmed I.A.M., Karloukovski V., MacLaren D.A., Foulds P.G., Allsop D., Calderon-Garciduenas L. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, vol. 113 (39), pp. 10797–10801.
4. Mazidi M., Speakman J.R. Ambient particulate air pollution (PM_{2.5}) is associated with the ratio of type 2 diabetes to obesity. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7 (1), pp. 1–7.
5. Cohen A.J., Brauer M., Burnett R., Anderson H.R., Frostad J., Estep K., Forouzanfar M.H. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the global burden of diseases study 2015. *Lancet*, 2017, no. 389 (10082), pp. 1907–1918.
6. Trifonov K.I., Devisilov V.A. *Fiziko-khimicheskie protsessy v tekhnosfere* [Physico-chemical processes in the technosphere]. Moscow, Forum: INFRA-M Publ., 2007. 240 p.
7. Dobrovolskiy V.V. *Osnovy biogeokhimii* [Fundamentals of biogeochemistry]. Moscow, Akademiya Publ., 2003. 400 p.
8. Silva R.A., West J., Zhang Y., Anenberg S., Lamarque J-F., Collins W.J., Dalsoren S.B., Faluvegi G., Folberth G.A., Horowitz L.W., Nagashima T., Naik V., Rumbold S., Skeie R.B.,

- Sudo K., Takemura T., Bergmann D., Cameron-Smith Ph., Cionni I., Doherty R.M., Eyring V., Josse B., MacKenzie I.A., Plummer D., Righi M., Stevenson D., Strobe S., Szopa S., Zeng G. Global premature mortality due to anthropogenic outdoor air pollution and the contribution of past climate change, *Environmental Research Letters*, 2013, no. 8, pp. 1–11.
9. Koval P.V., Kalmychko G.V., Geletya V.F., Leonova G.A., Medvedev V.I., Andralaitisa L.D. Correlation of natural and technogenic mercury sources in the Baikal polygon. *Russia Journal of Geochemical Exploration*, 1999, vol. 66, pp. 277–289.
 10. Koval P.V., Kalmychkov G.V., Lavrov S.M., Udodov Yu.N., Butakov E.V., Fajfild F.V., Alieva V.I. Anthropogenic component and mercury balance in the ecosystem of the Bratsk reservoir. *Reports of the Academy of Sciences*, 2003, vol. 388, no. 2, pp. 225–227. In Rus.
 11. Rush E.A., Koval P.V., Udodov Yu.N., Koroleva G.P., Gapon A.E., Andralaytis L.D. Razrabotka tekhnologii ochistki poverkhnostnogo stoka predpriyatiya «Usolekhiprom» (Yuzhnoe Pribaykale) [Development of surface runoff treatment technology of the Usolekhiprom enterprise (Southern Baikal region)]. *Inzhenernaya ekologiya*, 2007, no. 5, pp. 3–10.
 12. Alieva B.I., Butakov E.V., Pastuhov M.V., Andralaytis L.D. Features of technogenic pollution and forms of mercury transfer in the Bratsk reservoir. *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2011, no. 5, pp. 431–438. In Rus.
 13. Gordeeva O.N., Belogolova G.A., Pastukhov M.V. Mercury speciation and mobility in soils of industrial areas in the Baikal region, southern Siberia. *Environmental Earth Sciences*, 2017, vol. 76, no. 16, pp. 1–10.
 14. Song F., Gao Y. Size distributions of trace elements associated with ambient particular matter in the affinity of a major highway in the New Jersey–New York metropolitan area. *Atmospheric environment*, 2011, vol. 45, pp. 6714–6723.
 15. World Health Organization. *Burden of Disease from Ambient Air Pollution for 2012 – Summary of Results*. Geneva, Switzerland, WHO, 2014. 30 p.
 16. Konstantinova E., Minkina T., Konstantinov A., Sushkova S., Antonenko E., Kurasova A., Loiko S. Pollution status and human health risk assessment of potentially toxic elements and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban street dust of Tyumen city. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 409–432.
 17. Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman S.H.D. *Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova* [Monitoring of snow cover pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 182 p.
 18. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke stepeni zagryazneniya atmosfernogo vozdukhha naseleennykh punktov metallami po ikh sodержaniyu v snezhnom pokrove i pochve* [Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution of settlements with metals based on their content in snow cover and soil] Eds. B.A. Revich, Yu.E. Saet, R.S. Smirnova, E.P. Sorokina Moscow, IMGRE Publ., 1990. 8 p.
 19. Kuimova N.G., Sergeeva A.G., Shumilova L.P., Pavlova L.M., Borisova I.G. Ecological and geochemical assessment of aerotechnogenic pollution of urbanized territory according to the state of snow cover. *Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*, 2012, no. 5, pp. 422–435. In Rus.
 20. Sorokina O.I., Kosheleva N.E., Kasimov N.S., Golovanov D.L., Bazha S.N., Dorzhgotov D., Enh-amgalan S. Heavy metals in the air and snow cover of Ulaanbaatar. *Geography and natural resources*, 2013, no. 3, pp. 159–170. In Rus.
 21. Semenets E.S., Svistov V.P., Tapash A.S. Chemical composition of atmospheric precipitation of the Russian Arctic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 27–36. In Rus.
 22. Nazarenko Y., Fournier S., Kurien U., Rangel-Alvarado R.B., Nepotchatykh O., Seers P., Ariya P.A. Role of snow in the fate of gaseous and particulate exhaust pollutants from gasoline-powered vehicles. *Environmental Pollution*, 2017, vol. 223, pp. 665–675.
 23. Romanovskaya A.Yu., Savin I.Yu. Aerosol dust of soil origin in the atmosphere: sources, quantity, properties (overview). *Byulleten Pochvennogo instituta imeni V.V. Dokuchaeva*, 2021, vol. 109, pp. 36–95. In Rus.
 24. Golohvast K.S., Zhakov V.V., Nikiforov P.A., Chayka V.V., Romanova T.Yu., Karabtsov A.A. Atmospheric suspensions of Petropavlovsk-Kamchatsky according to the data of snow cover pollution: ecological analysis. *BULLETIN*, 2014, vol. 53, pp. 89–94. In Rus.
 25. Jenny A., Fisher F., Nelson P. Atmospheric mercury in Australia: recent findings and future research needs Recent findings and future research needs. *Element Science Anthropocene*, 2020, vol. 3, pp. 11623–11636.
 26. Ben Yu, Lin Yang, Hongwei Liu, Cailing Xiao, Duo Bu, Qiangying Zhang Jianjie Fu, Qiangong Zhang, Zhiyuan Cong, Yong Liang, Ligang Hu Yongguang Yin, Jianbo Shi, and Guibin Jiang. Tracing the transboundary transport of mercury to the Tibetan Plateau using atmospheric mercury isotopes. *Environmental Science & Technology*, 2022, no. 56, 3, pp. 1568–1577.
 27. Shah V., Jacob D.J., Thackray C.P., Wang X., Sunderland E.M., Dibble Th.S., Saiz-Lopez A., Černušák I., Kellö V., Castro P.J., Wu R., Wang Ch. Improved mechanistic model of the atmospheric redox chemistry of mercury. *Environmental Science & Technology*, 2021, vol. 55 (21), pp. 14445–14456.
 28. Zhao X., Guo X., Mao Y., Yan H., Li M., Zhao L. Chemical and mineral characteristics of melted snow-water in the Jilin Province, North-East China. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, vol. 6, pp. 1–9.
 29. Yuan D., Liu Y., Guo X., Liu J. Characteristic contaminants in snowpack and snowmelt surface runoff from different functional areas in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25, pp. 36256–36266.
 30. Ramirez O., Sánchez de la Campa A.M., Amato F., Moreno T., Silva L.F., De la J.D. Rosa Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 434–446.
 31. Ukrainteva A.V., Plyusnina A.M., Zaikovskii V.I. Morphology and chemical composition of dispersed particles in the snow cover of burnt forest areas in Western Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 122, pp. 15–25.
 32. Ivanickiy M.S. Analysis of the influence of the characteristics and conditions of fuel oil combustion on the yield of vanadium pentoxide. *Vestnik MEI. Energetika*, 2017, no. 1, pp. 20–24. In Rus.
 33. Vyazova N.G., Shaulina L.P., Shmidt A.F., Dimova L.M. Mikroelementy v uglyakh vostochnoy Sibiri [Trace elements in the coals of Eastern Siberia]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2016, no. 5, pp. 45–55.
 34. Arbutov S.I. *Geokhimiya redkikh elementov v uglyakh Sibiri* [Geochemistry of rare elements in Siberian coals]. Tomsk, D-Print Publ. house, 2007. 468 p.
 35. Galiulin R.V., Galiulina R.A. Zagryaznenie territorii Chelyabinskaya i ego okrestnostey myshyakom pri szhiganiy uglya [Contamination of the territory of Chelyabinsk and its environs with arsenic during coal burning]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2011, no. 3, pp. 58–60.
 36. Lomonosov I. S., Makarov V. N., Khaustov A. P. *Ekogeokhimiya gorodov Vostochnoy Sibiri* [Ecogeochimistry of the cities of Eastern Siberia]. Yakutsk, Publ. SO RAN, Institute of Permafrost Studies, 1993. 107 p.
 37. Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Osipova N.A., Lyapina E.E., Litay V.V., Metreveli G., Kim J. Mercury pollution in snow cover around thermal power plants in cities (Omsk, Kemerovo, Tomsk Regions, Russia). *Geography, Environment, Sustainability*, 2019, no. 12, pp.132–147.
 38. Kizilshteyn L.Y., Levchenko S.V. Elementy-primesi i ekologicheskie problemy ugolnoy energetiki [Impurity elements in the flue emissions of coal-fired thermal power plants]. *Thermal Engineering*, 2003, no. 12, pp. 14–19.
 39. Kizilshteyn L.A. Elementy-primesi v dymovykh vybrosakh ugolnykh TES [Impurity elements in the flue emissions of coal-fired thermal power plants]. *Energy: economics, technology, ecology*, 2017, no. 6, pp. 32–36.
 40. Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Shtayn (Stein) R.R., Goryunova N.V., Klyuvitkin A.A., Kravchishina M.D., Krivs M. (Kriews), Novigatskiy A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H.C. (Haas) Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow. *Problems of the Arctic and Antarctic*, 2007, no. 1 (75), pp. 106–118. In Rus.

Received: 15 June 2022.

Information about the authors

Marina S. Kholodova, junior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

Mikhail V. Pastukhov, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

Valery A. Bychinsky, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.

Sergey N. Prosekin, junior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS; junior researcher, Irkutsk National Research Technical University.

Olga Yu. Belozeroва, Cand. Sc., senior researcher, Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS.