

Оценка содержания металлов и металлоидов в снежном покрове на участках нефтедобычи Среднего Приобья

© 2022 г. Д.В. Московченко^{1,2}, Р.Ю. Пожитков¹, А.А. Тигеев¹

¹Тюменский научный центр Сибирского отделения РАН, Тюмень, Россия;

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*moskovchenko1965@gmail.com

Assessment of the content of metals and metalloids in the snow cover at the oil production sites (Middle River Ob region)

D.V. Moskovchenko^{1,2}, R.Yu. Pozhitkov¹, A.A. Tigeev¹

¹Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia; ²Tyumen State University, Tyumen, Russia

*moskovchenko1965@gmail.com

Received June 1, 2022 / Revised July 13, 2022 / Accepted October 7, 2022

Keywords: *snow cover, metals and metalloids, oil field, West Siberia, environmental pollution.*

Summary

This article presents results of investigation of dust load and content of metals and metalloids (MMs) in the snow samples taken at the Vatin'skoye oil field (Khanty-Mansi Autonomous District – Yugra). Concentrations of dissolved and suspended forms of MMs in 20 samples collected in March 2021 were determined by the ICP-MS and ICP-AES methods. Eighteen elements (Ag, Ba, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, W, and Zn) indicating various sources of emissions were selected for further analysis. Filters with a pore diameter of 0.45 µm were used to separate dissolved and suspended forms. Enrichment of the suspension with chalcophile elements (Ag, Cu, Zn, Sn, Sb, Pb) was noted in the background areas. Calculations of enrichment coefficients (CO) using Li as a reference element demonstrated that Cu, Mn and Ni come from natural sources (rocks and soils), while the others have a mixed natural-anthropogenic origin. It was noted also that the mass fraction of a number of metals (Cr, Cu, Ni, Zn) increases in solid-phase deposits. The metals Zn, Cu and Cr are mainly contained in snow in suspended form, and Ni – both in dissolved and suspended forms. As a result of calculations of the total Cr pollution index, most of the deposit is classified as "low, non-hazardous" pollution areas. The highest concentrations of MMs in the snow were found in the southern part of the deposit, where the main infrastructure facilities and the communications lines are concentrated, including roads, railways and pipelines/ They were specified as "average, moderately dangerous" level of pollution. To determine sources of pollution, the factor analysis was applied, and as a result of which two main factors were identified: 1) the background pollution, which is indicative of deposition of Cu, Sn, Sb, Ag; 2) the anthropogenic one, corresponding to high levels of Cr, Ni, Zn. Spatial analysis of the MMs distribution showed that the deposition of Ni, Cr is associated with drilling operations, while Zn – with the presence of transport. The data obtained can be used to understand the processes of atmospheric deposition of potentially toxic metals and metalloids, as well as to assess the quality of the environment at oil and gas fields.

Citation: Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Tigeev A.A. Assessment of the content of metals and metalloids in the snow cover at the oil production sites (Middle River Ob region). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2022, 62 (4): 551–563. [In Russian].
doi: 10.31857/S2076673422040151, edn: mhmzon:

Поступила 1 июня 2022 г. / После доработки 13 июля 2022 г. / Принята к печати 7 октября 2022 г.

Ключевые слова: *снежный покров, тяжёлые металлы и металлоиды, нефтяное месторождение, Западная Сибирь, загрязнение окружающей среды.*

Проведена оценка уровня загрязнения снежного покрова потенциально токсичными металлами и металлоидами на территории Ватинского нефтяного месторождения (Ханты-Мансийский автономный округ – Югра). В результате исследования фильтрата талого снега и твёрдофазных выпадений (частиц крупнее 0,45 мкм) отмечено увеличение концентрации Ni и Cr, связанное с ведением буровых работ, а также Zn за счёт работы транспорта. Уровень загрязнения возрастает на участках с повышенной концентрацией промышленных объектов.

Введение

Одно из экологических последствий разработки нефтяных месторождений Среднего Приобья – поступление в окружающую среду

разнообразных загрязнителей. Объектом исследования были почвы, в которых наблюдается рост содержания Ni, Sr, Ba, Mn (Водяницкий и др., 2012). Аэротехогенное загрязнение исследовано меньше, хотя воздушный путь распро-

странения загрязнителей — наиболее быстрый и масштабный. Снег загрязняется сильнее, чем жидкие осадки, поэтому его считают хорошим индикатором антропогенной нагрузки (Касимов и др., 2012). Недавние исследования в нефтегазодобывающих районах севера Западной Сибири показали эффективность применения снега для индикации техногенного загрязнения и анализа экологической ситуации (Московченко, Бабушкин, 2012; Pozhitkov et al., 2020). Исследованы фоновые геохимические показатели снега в регионе (Shevchenko et al., 2017). Однако участки техногенеза в основном нефтедобывающем регионе России — Среднем Приобье остаются недостаточно исследованными. Цель работы — оценить уровень аэротехногенного загрязнения по данным состава снеговой воды на примере Ватинского нефтяного месторождения. Задачи работы — определить элементный состав твёрдофазных выпадений и содержания поллютантов, находящихся в растворённом состоянии, выделить приоритетные загрязнители, оценить экологическое состояние территории месторождения.

Объект исследования

Ватинское нефтяное месторождение площадью 621 км² расположено в Нижневартовском районе (Ханты-Мансийский автономный округ — Югра), в 25 км к северо-западу от г. Нижневартовск. Это — одно из самых «старых» месторождений в Западной Сибири, открытое в 1963 г. и введённое в эксплуатацию в 1965 г. Длительный период эксплуатации обусловил большое число и высокую плотность размещения техногенных объектов. Здесь находится почти 2000 эксплуатационных и разведочных скважин, пять факелов сжигания попутного газа, дожимные насосные станции, карьеры минерального грунта и торфа, электроподстанции. Ватинское месторождение граничит с другими месторождениями (Самотлорским, Мегионским, Южно-Аганским) и связано с ними сетью дорог и трубопроводов, образуя единый техногенный комплекс. Климат района исследований — континентальный, умеренно холодный. Среднегодовая температура воздуха составляет $-1,4^{\circ}\text{C}$, средняя продолжительность периода со снежным покровом 204 дня (Kuznetsova, 2020). Северная часть ме-

сторождения приурочена к надпойменным террасам р. Обь с господством олиготрофных болот, южная часть расположена в пойме Оби, где преобладает луговая и кустарниковая растительность. Леса в основном производные, с доминированием берёзы в составе древостоя. Плоский рельеф, а также небольшая доля (30%) залесённых участков определяют относительно равномерные условия для осаждения пылевых частиц.

Материалы и методы

Пробы снежного покрова отобраны при максимальной его толщине (вторая декада марта 2021 г.) в шурфах (Янченко, 2020). По данным наблюдений на метеостанции (ГМС) г. Нижневартовск (www.gr5.ru) в зимний сезон 2020/21 г. преобладали ветры западных и северо-западных румбов, а устойчивый снежный покров начал формироваться 24 октября. До момента опробования прошло 144 дня, за которые выпало 115 мм осадков. Пробы отбирали пластиковым совком из всей снежной толщи, за исключением 3 см слоя над почвой, чтобы избежать поступления почвенных частиц, и помещали в полиэтиленовые пакеты. Масса каждой пробы снега составляла 6–8 кг, что обеспечивало достаточное количество твёрдого осадка, необходимого для химико-аналитических исследований (10–100 мг).

Для определения элементов-загрязнителей, свойственных различным источникам эмиссий, пункты опробования размещали таким образом, чтобы охватить многообразие техногенных объектов месторождения: эксплуатационные кусты скважин; дожимные насосные станции с факелами сжигания попутного газа; площадки разведочного бурения; коридоры коммуникаций. В каждом пункте опробования проводили измерения толщины покрова, плотности снега и снегозапаса с помощью весового снегомера ВС-43. Было отобрано 20 проб, из них 14 — на территории месторождения, на расстоянии 50–400 м от объектов инфраструктуры, и 6 — на условно-фоновом участке, расположенном на удалении 50–60 км от Ватинского месторождения в юго-восточном направлении. Схема опробования приведена на рис. 1.

Снег растаивали при комнатной температуре. В лаборатории в снеговой воде находили значе-

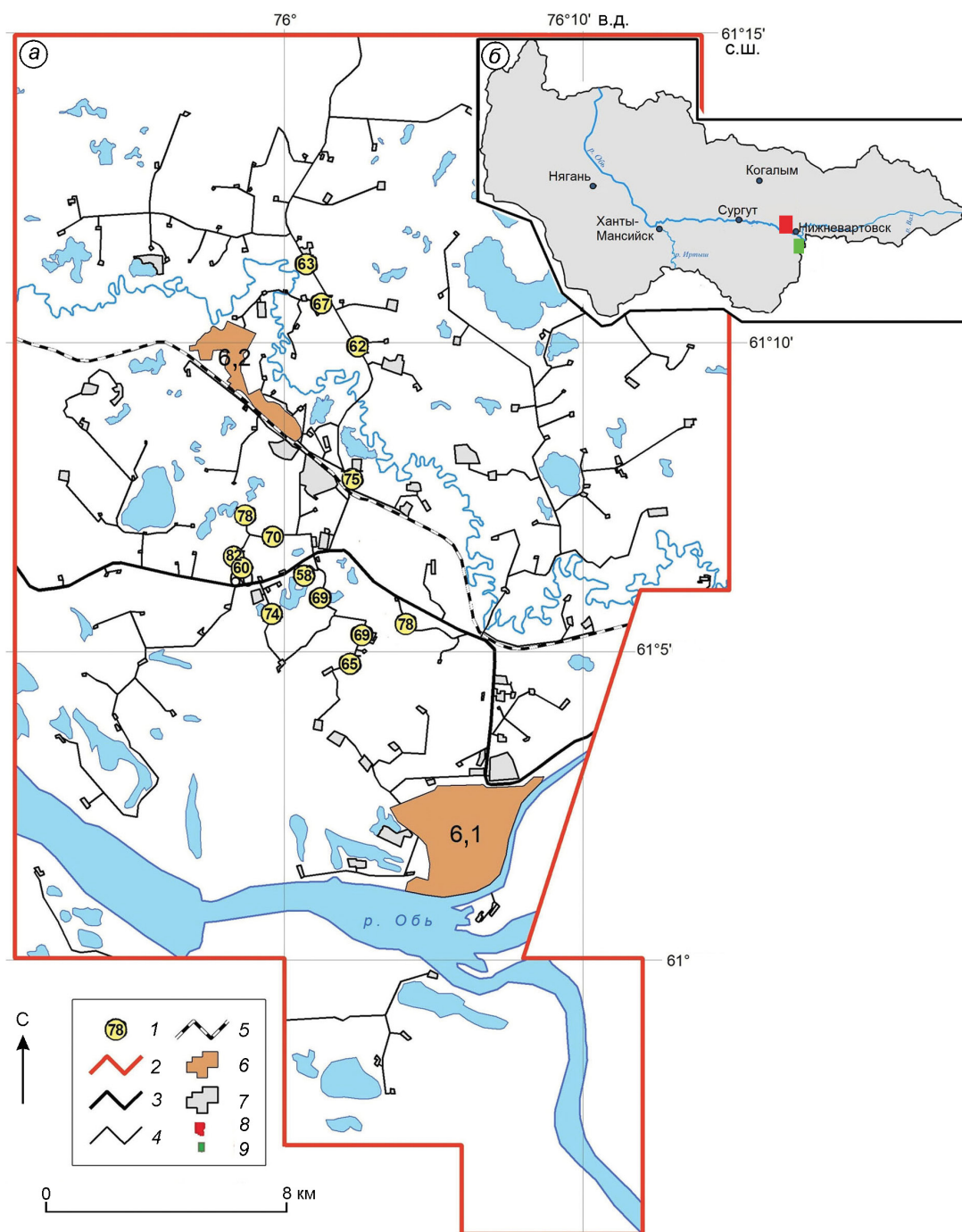


Рис. 1. Схема опробования снежного покрова Ватинского месторождения:

a – расположение пунктов опробования; *б* – местоположение Ватинского месторождения в пределах Ханты-Мансийского автономного округа; 1 – точки опробования; 2 – граница Ватинского нефтяного месторождения; 3 – автодорога Сургут–Нижневартовск; 4 – внутрипромысловые дороги Ватинского месторождения; 5 – железная дорога; 6 – населённые пункты (6.1 – г. Мегион, 6.2 – пос. Высокий); 7 – промышленные объекты (кустовые площадки, дожимные насосные станции, промышленные площадки и др.); 8 – расположение Ватинского месторождения; 9 – участок фонового опробования. Цифрами внутри точек опробования обозначена мощность снежного покрова

Fig. 1. Map showing study areas and sampling sites locations:

a – Sampling sites layout; *б* – Location of the Vatinskoye field within the Khanty-Mansi Autonomous Okrug; 1 – sampling sites; 2 – border of the oil field; 3 – Surgut-Nizhnevartovsk highway; 4 – access roads to the Vatinskoye oil field; 5 – railway; 6 – populated areas (6.1 – Megion City, 6.2 – village Vysokiy); 7 – oilfield infrastructure facilities (well pads, booster pumping stations, industrial sites); 8 – location of the Vatinskoye field; 9 – location of the background sampling site. The numbers within the sampling points indicate the thickness of the snow cover

ния pH ионометром HydroMaster HM-500 и электропроводность — кондуктометром СОМ-100. Путём фильтрования через предварительно взвешенные нитроцеллюлозные беззольные фильтры марки «Millipore» с диаметром пор 0,45 мкм разделяли жидкую (фильтрат) и твёрдую (фильтр со взвесью) фазы, которые анализировали отдельно. Фильтры с твёрдой фазой после высушивания взвешивали на лабораторных аналитических весах с дискретностью 0,1 мг для установления массы твёрдофазных выпадений. Фильтрат талого снега помещали в полипропиленовые пробирки вместимостью 15 мл. Элементный состав твёрдой фазы и фильтрата талого снега исследовали в аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН. Содержание элементов определяли с использованием методов масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS, прибор Thermo Scientific X-7) и атомно-эмиссионной спектрометрии (ICP-AES, прибор Scientific iCAP-6500 Duo); для ртути применяли отдельные навески. Методика разложения образцов и выполнения измерений изложена в работах (Karandashev et al., 2008; Карандашев и др., 2016).

Для проверки точности анализа применялись стандартные образцы: для твёрдофазных выпадений — Трапп СТ-2а (ГСО 8671-2005) (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20237703.v1>), для фильтрата — образец питьевой воды «Trace Metals in Drinking Water» производства High-Purity Standards (США) (<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20237712.v1>). Результаты анализа элементов в стандартных образцах, пределы обнаружения и сертифицированные значения содержания элементов приведены в дополнительных материалах. В результате анализов определено содержание 53 элементов, из которых для статистического анализа выбрано 18 (Ag, Ba, Bi, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Li, Mn, Ni, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, W, Zn). Эти элементы в основном поступают из антропогенных источников и опасны для здоровья населения. Они могут быть индикаторами различных форм воздействия: например, Hg и Cr поступают в атмосферу при сжигании угля; Ni и Sn — при сжигании нефти (Nriagu, Расуна, 1988). Не рассматривались данные о содержании V, Mo и As, так как более чем в 50% проб их содержание было ниже предела обнаружения.

Статистическая обработка результатов выполнена в программах Microsoft Office Excel и Statistica 10.0. Содержание большинства химических элементов не соответствовало нормальному закону распределения, поэтому в качестве средних величин применяли среднее геометрическое. Полученные результаты обрабатывались в соответствии с общепринятой методикой, неоднократно применённой для оценки экологического состояния урбанизированных территорий (Саэт и др., 1990; Касимов и др., 2012). Для анализа геохимических свойств выпадений подсчитаны кларки концентрации КК и рассеяния КР. Для подсчётов выбраны значения кларков по (Rudnick, Gao, 2003). Пылевую нагрузку Pn вычисляли по формуле

$$Pn = m/(S \cdot T), \quad (1)$$

где m — масса пыли, осаждаемой на фильтре; S — суммарная площадь отбора проб; T — временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова.

Далее находилась масса каждого элемента, поступающего на снежный покров D :

$$D = Pn \cdot C, \text{ мг/км}^2 \text{ в сутки}, \quad (2)$$

где Pn — пылевая нагрузка; C — концентрация элемента во взвеси, осаждаемой на фильтре.

Для оценки загрязнения были вычислены:

1) коэффициенты концентрации элементов —

$$Kc = C/Cф, \quad (3)$$

где C — концентрация элемента на месторождении; $Cф$ — концентрация элемента на условно-фоновой территории;

2) коэффициенты превышения выпадений над фоном —

$$Kd = D/Dф, \quad (4)$$

где D — масса элемента, поступающего на поверхность снежного покрова на месторождении; $Dф$ — масса элемента, поступающего на поверхность снежного покрова на условно-фоновой территории;

3) суммарные показатели загрязнения —

$$Zc = \sum Kc - (n - 1); \quad (5)$$

4) суммарные показатели выпадения элементов —

$$Zd = \sum Kd - (n - 1), \quad (6)$$

где n — число химических элементов с Kc или $Kd > 1,5$.

Для определения соотношения природных и техногенных источников ММ подсчитан коэффициент обогащения КО по формуле

$$КО = (Ci \div C_{Li})_{\text{проба}} / (Ci \div C_{Li})_{\text{земная кора}}, \quad (7)$$

где Ci и C_{Li} — соответственно содержание интересующего элемента и Li в пробе или в земной коре.

Результаты и их обсуждение

По данным 14 пунктов опробования толщина снежного покрова на территории месторождения составила в среднем 69 см (изменяется от 58 до 78 см) (см. рис. 1). На условно-фоновом участке средняя толщина покрова несколько выше — 75 см при колебаниях от 65 до 89 см (рис. 2, а). По данным наблюдений на ГМС Нижневартовск (www.gr5.ru) с 2006 по 2022 г. максимальная за зимний период толщина снежного покрова в разные годы изменялась от 54 до 105 см (в среднем 83 см). Таким образом, толщина снежного покрова в период опробования на фоновой территории была близкой к средним показателям, а условия снегонакопления типичны для восточных районов ХМАО—Юрга. Средняя плотность снега в пределах месторождения — 0,17 г/см³, что несколько меньше средних значений для региона — 0,23–0,25 г/см³ (Пожитков и др., 2020). На фоновом участке плотность была меньше (в среднем 0,155 г/см³) (см. рис. 2, б). Пониженная плотность снега обусловлена низкими температурами воздуха и отсутствием оттепелей в зимний сезон 2020/21 г.

Снеговые воды имели кислую реакцию. Средняя величина pH на месторождении составила 4,8 ед. (4,5–5,8 ед.), на фоновой территории — 4,4 ед. (см. рис. 2, в). Подкисление снега свойственно всем северным районам Западной Сибири. Так, при изучении состава снега на широтном градиенте от г. Томска до тундр Тазовского полуострова получено среднее значение pH = 5,11 (Shevchenko et al., 2017). Смещение pH снеговых вод в «кислую» сторону ранее отмечено в Нижневартовском районе (Пожитков и др., 2020). Причины закисления атмосферных осадков в Западной Сибири — недостаток кислотных нейтрализаторов (Василенко и др., 2007), а также сжигание попутного газа на нефтедобывающих производствах (Моисеенко и др., 2017).

На обследованном условно-фоновом участке содержание взвеси в снеговых водах изменялось от 0,32 до 1,1 мг/л, что укладывается в диапазон 0,2–3,4 мг/л, установленный для снега фоновых участков Арктики и северной части бассейна Оби (Шевченко и др., 2007; Shevchenko et al., 2020). Средняя величина пылевой нагрузки на фоновом участке — 0,6 мг/м² в сутки (см. рис. 2, г). Ранее установлено, что пылевая нагрузка на фоновых участках юга Западной Сибири для Омской и Новосибирской областей составляет около 3 мг/м² в сутки (Литау и др., 2015; Ермолов, Смоленцев, 2020), для Тюменской области — 3,2 мг/м² в сутки (Московченко и др., 2021). Таким образом, содержание твердых нерастворимых частиц в снеге фоновой территории было низким. На месторождении содержание взвеси в снеговых водах изменялось в

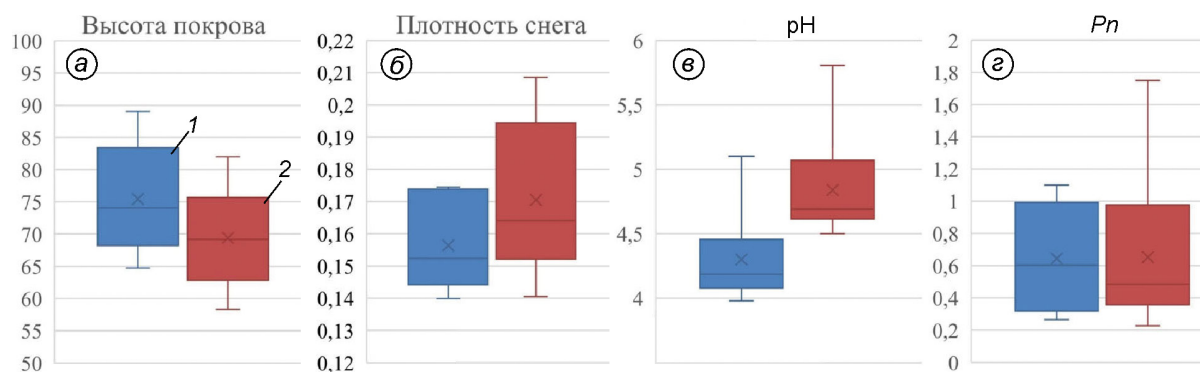


Рис. 2. Параметры снежного покрова и физико-химические свойства снега фоновой территории и Ватинского месторождения («ящик» — верхний и нижний квартили, «усы» — максимальное и минимальные значения)

Fig. 2. Parameters of snow cover and physical-chemical properties of snow of the background area and Vatinskoye field («box» — upper and lower quartiles, «whiskers» — max and min values)

Таблица 1. Элементный состав снега фоновой территории ($n = 6$)*

Элементы	Твёрдая фаза, мг/кг (Fe – %)							Растворимая форма, мкг/л				
	ПО	X	Me	SD	KK	KP	C3C	ПО	X	Me	SD	C3C
Ag	0,03	2,7	2,5	1,6	57,5	—	—	0,003	< ПО	< ПО	—	—
Ba	0,7	205	175	102,8	—	2,8	391	0,05	1,7	1,6	0,4753	3,3
Bi	0,005	0,72	0,66	0,17	2,4	—	—	0,001	< ПО	< ПО	—	—
Cd	0,04	<ПО	<ПО	—	—	—	0,71	0,005	0,039	0,035	0,0205	0,039
Cr	0,7	508	493	228	5,9	—	156	0,6	< ПО	< ПО	—	0,11
Cu	0,6	267	264	96	10	—	75	0,4	7,6	7,7	1,9	0,57
Fe	0,006	1,3	1,23	0,3	—	3	1,65	3	4,1	5	4,8	14,6
Hg	0,01	0,84	0,8	0,4	9,1	—	—	0,01	< ПО	< ПО	—	—
Li	0,03	7,6	7,1	2,5	—	2,7	10,7	0,006	0,015	0,016	0,002	—
Mn	1	275	253	95	—	3,6	404	0,06	3,4	3,7	1,3	3,1
Ni	0,7	103	92	64	2,5	—	145	0,03	0,11	0,1	0,1	0,36
Pb	0,5	121	125	51	7,6	—	67,9	0,01	1,6	1,5	1	0,51
Sb	0,03	10,3	9,5	4,1	27,3	—	6,15	0,003	0,022	0,023	0,0041	0,036
Sn	0,08	9,8	8,4	11,1	5,9	—	7,4	0,007	< ПО	< ПО	—	—
Sr	0,06	64,5	65	29,4	—	5,6	115	0,05	0,88	0,94	0,19	1,04
Ti	7	909	512	365	—	8,1	0,069	0,6	< ПО	< ПО	—	0,032
W	0,03	4,7	4,7	3,6	2,8	—	28,8	0,0004	< ПО	< ПО	—	0,02
Zn	0,9	414	414	132	6,4	—	255	0,6	15,6	15,9	9,3	8,3

* n – число проанализированных образцов; ПО – предел обнаружения; < ПО – содержание ниже предела обнаружения более чем в 50% проб; X – среднее геометрическое значение; Me – медиана; SD – стандартное отклонение; KK – кларк концентрации; KP – кларк рассеяния; C3C – среднее по северу Западной Сибири (Shevchenko et al., 2017); прочерк – показатель не определялся.

пределах 0,13–2,5 мг/л, что близко к фоновым показателям территории. Ранее при изучении атмосферных выпадений на нефтяных месторождениях в Томской области отмечено, что на удалении 200 м от факелов сжигания попутного нефтяного газа значения пылевой нагрузки сопоставимы с фоновыми (Филимоненко, 2015). Следовательно, эмиссии твёрдых частиц от объектов нефтедобычи на Ватинском месторождении незначительны.

Данные об элементном составе снега на фоновой территории, значения кларков концентрации и рассеяния (KK и KP), а также средние значения по северу Западной Сибири по (Shevchenko et al., 2017) приведены в табл. 1. На фоновых участках в твёрдофазных выпадениях концентрируются Ag, Cr, Cu, Zn, Sn, Sb, Pb, Hg (KK > 3). К слабоконцентрирующимся элементам ($1,5 < KK < 3$) относятся Ni, W и Bi; сниженные относительно кларка концентрации ($1,5 < KP < 3$) отмечены для Li, Fe и Ba; Ti и Sr рассеиваются (KP > 3). По сравнению со среднерегиональными значениями (Shevchenko et al., 2017) на исследованном фоновом участке в твёрдофазных выпадениях в

1,5–3,5 раза повышено содержание Cu, Zn, Pb и Cr. Концентрации остальных элементов близки к среднерегиональным значениям или ниже их. Среднее содержание Cr (508 мг/кг) в 3–5 раз превышает значения регионального фона, оцениваемого на уровне от 110 (Таловская и др., 2014) до 156 мг/кг (Shevchenko et al., 2017). Содержание Cu больше уровня регионального фона примерно на один математический порядок. Ni и V, которые считаются индикаторами сжигания нефти (Nriagu, Расуна, 1988), содержатся в низких концентрациях: содержание Ni не превышает среднерегиональное значение по (Shevchenko et al., 2017), а содержание V в большинстве проб ниже предела обнаружения.

Подсчёты коэффициента обогащения КО показали, что снеговая пыль в максимальной степени обогащена Ag (среднее значение КО = 148). Затем в порядке убывания следуют: Sb, Cu, Hg, Pb, Sn, Zn, Cr, у которых $10 < КО < 100$ (рис. 3). Согласно (Li et al., 2015), значение КО < 10 указывает на формирование твёрдой фазы снега под влиянием природных источников, КО = $10 \div 100$ свидетельствует о

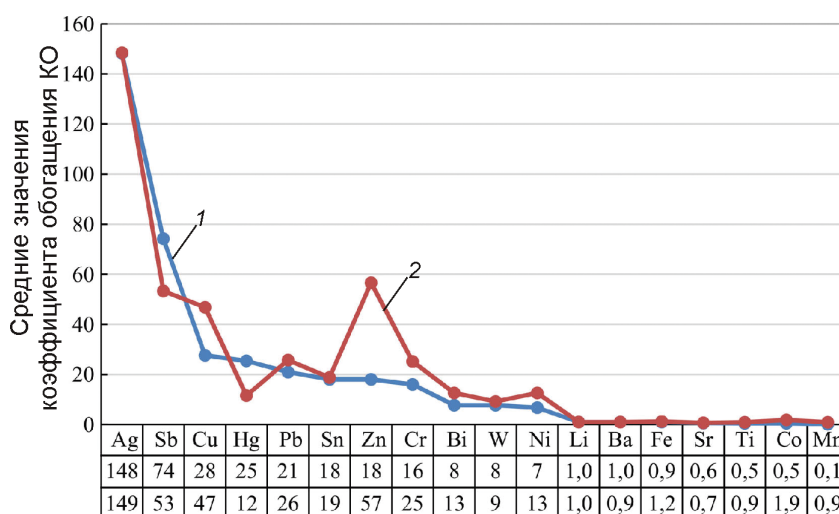


Рис. 3. Средние значения коэффициентов обогащения элементов в твёрдофазных выпадениях:

1 – фоновый участок; 2 – Ватинское месторождение

Fig. 3. Mean enrichment factors of elements in the particulate matter:

1 – Background area; 2 – Vatinskoye oil field

смешанном пути поступления (как природный, так и антропогенный), КО > 100 показывает антропогенный путь поступления. Таким образом, Co, Mn, Ni имеют на фоновой территории природное происхождение, смешанные природно-антропогенные источники поступления характерны для халькофильных элементов и Cr.

Аккумуляция халькофильных элементов в твёрдой фазе снега на фоновых участках ранее была установлена как на Европейской территории России (Касимов и др., 2012), так и в Западной Сибири (Московченко и др., 2021). Тенденция концентрирования халькофильных элементов в твёрдофазной составляющей снеговых выпадений проявляется в разных фоновых районах Земли. Например, сходная с нашей ассоциация накапливающихся элементов отмечена в горных районах Азии, где снег содержит высокие концентрации Cd, Zn, Pb, As, Mo и Cu (КО > 100) (Li et al., 2015). В Канаде значения КО > 10 в твёрдофазной составляющей снега отмечены главным образом для халькофильных элементов: Cd, As, Sb, Ag, Pb, Cu, Zn, In, Mo, Ni, Cr (Telmer et al., 2004). Таким образом, элементный состав твёрдой фазы снега фоновой территории типичен для фоновых территорий Северного полушария Земли, за исключением низкого содержания Cd, и зависит главным образом от процессов дальнего переноса аэрозолей. Преимущественное накопление халькофильных

элементов свойственно фоновым территориям Земли и свидетельствует о влиянии трансграничного переноса на формирование твёрдофазных выпадений обследованного фоновой территории участка. В растворённой форме, как и во взвеси, повышено содержание Cu, Zn и Pb. Отмечалось, что Zn, Cu, Mn и Ni в аэрозольных частицах, связанные с карбонатными минералами, хорошо растворимы (Desboeufs et al., 2005), и этим объясняется повышенное содержание этих элементов.

Разработка месторождений углеводородов приводит к формированию обширных шлейфов аэрозольного загрязнения (Алтунина и др., 2014). Основные объекты, влияющие на состав атмосферы, – факелы сжигания попутного нефтяного газа, разведочные буровые, компрессорные станции и котельные (Ященко и др., 2014; Большунова, 2015). Значительное загрязнение снега металлами (Cu, Mn, Fe) установлено в районе вахтового посёлка Заполярного газового месторождения (Pozhitkov et al., 2020). Наряду с объектами нефтедобычи, источником загрязнения служит автотранспорт. Поступление твёрдых частиц происходит не только от сжигания попутного природного газа, но и при ветровой эрозии открытого почвенного покрова, который образуется из-за таяния снежного покрова вблизи факела за счёт термического воздействия (Таловская, 2022).

На Ватинском месторождении массовая доля тяжёлых металлов в твёрдой фазе уменьшается в

Таблица 2. Элементный состав снега Ватинского месторождения ($n = 14$)*

Элементы	Твёрдая фракция, мг/кг (Fe – %)						Растворимая форма, мкг/л			
	$\bar{X}$	Me	SD	D	Kc	Kd	$\bar{X}$	Me	SD	Kc
Ag	2,8	3	1,7	1,4	1	0,9	< ПО	< ПО	–	–
Ba	219	215	98,4	156	1,1	1	1,6	1,4	1	0,9
Bi	0,91	0,84	0,35	0,7	1,3	1,1	< ПО	< ПО	–	1,3
Cd	< ПО	< ПО	0,5	–	0,8	1,2	0,033	0,030	16,1	0,9
Co	3,0	1,7	6,6	11,8	0,4	1,5	< ПО	< ПО	–	–
Cr	717	631	966	431	1,4	1,4	< ПО	< ПО	–	–
Cu	478	433	274	239	1,8	1,5	4,1	4,7	1,9	0,5
Fe	1,8	1,72	0,7	11,5	1,4	1,4	2,7	1,5	3,2	0,4
Hg	0,39	0,38	0,13	0,26	0,5	0,4	< ПО	< ПО	–	–
Li	8,4	9,1	2,1	5,1	1,1	1,1	0,019	0,018	5,1	1,4
Mn	275	471	95	276	1,0	1,0	4,1	3,3	6,1	1,2
Ni	163	135	404	129	1,6	1,8	0,18	0,12	0,44	2,2
Pb	167	173	55,2	107	1,4	1,3	0,83	0,92	0,54	0,5
Sb	7,8	7,8	5	3,9	0,8	0,6	0,032	0,032	9,5	1,4
Sn	13,2	14,9	10,4	6,9	1,3	0,9	< ПО	< ПО	0,8	1
Sr	83,7	79	18,3	53	1,3	1,2	1,1	0,9	0,66	1,3
Ti	1305	1986	300	2,5	1,4	1,3	< ПО	< ПО	–	–
W	6,5	7,2	2,5	3,6	1,4	1,2	< ПО	< ПО	–	–
Zn	905	687	3017	594	2,2	2,2	10,5	9,4	5,4	0,7

* $\bar{X}$ – среднее геометрическое значение; Me – медиана; SD – стандартное отклонение; D – масса элемента, поступающего на поверхность снежного покрова на месторождении, мг/км² в сутки; Kc – коэффициент концентрации элементов; Kd – коэффициент превышения выпадений элементов на месторождении по сравнению с фоном; < ПО – содержание было ниже предела обнаружения более чем в 50% проб; прочерк – показатель не определялся.

ряду $Zn > Cr > Cu > Mn > Pb > Ni > Co > Cd$. Такой ряд не характерен для среднего состава верхней части земной коры по данным (Rudnick, Gao, 2003) и почв севера Западной Сибири (Опекунова и др., 2019), в которых из перечисленных элементов максимально содержание только Mn. Преобладание Zn, Cr и Cu, типичных для промышленной пыли и твёрдых отходов (Касимов и др., 2012), показывает влияние антропогенных источников на формирование состава снега. Подтверждает антропогенное влияние высокая контрастность геохимических аномалий: в отдельных пунктах опробования отмечено превышение над средними фоновыми концентрациями для Zn – в 29 раз, Ni – в 15 раз, Cr – в 12 раз. Концентрация этих элементов сильно варьирует: величина стандартного отклонения превышает среднее значение (табл. 2). По сравнению с фоновым участком средние концентрации Cu и Zn увеличиваются соответственно в 1,8 и 2,2 раза (см. табл. 2). Менее активно накапливаются Ni, Cr, Pb, W, Ti ($1,4 < Kc < 1,6$). Остальные элементы с $Kc < 1,4$ накапливаются слабо или деконцентрируются.

Обращает на себя внимание высокая концентрация Zn и Cr – в среднем 905 и 717 мг/кг соответственно, что приблизительно на один математический порядок выше кларка континентальной земной коры и находится на одном уровне с концентрацией в снеговой пыли крупных промышленных городов. Так, в нерастворимой взвеси снежного покрова восточного административного округа Москвы (Касимов и др., 2012) средняя концентрация Zn и Cr равна соответственно 673 и 135 мг/кг, а в Тюмени (Московченко и др., 2021) – 639 и 590 мг/кг. Ранее отмечалось, что на нефтяных месторождениях наблюдается рост содержания Cr в 3,8–4,5 раза по сравнению с фоновыми показателями (Московченко, Бабушкин, 2012). Отмечено, что содержание многих элементов, в том числе Zn, Cr, Co и Hg, в растворённом состоянии ниже предела обнаружения. В растворённой форме по сравнению с фоном наблюдается рост концентрации Ni, Sb, Mn, Bi. Однако выражен он слабее, чем в составе твёрдофазных выпадений, за исключением Ni, для которого отмечено увеличение в 2,2 раза в растворённой форме (см. табл. 2).

Таким образом, ассоциация элементов-загрязнителей на Ватинском месторождении включает в себя Ni, Zn, Cu и Cr. Поступление Ni происходит как в составе твёрдофазных выпадений, так и в растворённой форме, Zn, Cu и Cr — с нерастворимыми частицами. Поступление микроэлементов от объектов нефтедобычи в атмосферный воздух ранее исследовано на территории Томской области, где в нефтедобывающих районах снежная пыль отличается повышенным содержанием Cr, Pb, Sb, Zn, Ba и As (Большунова, 2015). В эпифитных лишайниках — индикаторах пылевых выпадений — содержание Cr, Fe, Zn и Sb повышено по сравнению со среднерегionalными величинами (Межибор, Большунова, 2014). Обращает на себя внимание, что индикаторами воздействия нефтедобычи, как и в наших результатах, служат Cr и Zn.

Вероятные источники поступления этих металлов требуют обсуждения. Наиболее часто в качестве источника техногенных аэрозолей на нефтяных месторождениях указываются факелы сжигания попутного нефтяного газа, которые выбрасывают в атмосферу сажу, диоксид углерода CO₂, диоксид азота NO₂ (Токарева, Полищук, 2011), а также бенз(а)пирен, сернистый ангидрид, тяжёлые металлы (Ященко и др., 2014). На

месторождениях ХМАО — Юрга возле факелов сжигания попутного газа отмечено повышенное содержание в снеге Zn, Fe, Mn, Cu, Cr и Ni (Московченко, Бабушкин, 2012). Исследование элементного состава нефти (Begak, Syroezhko, 2001) показало значительную изменчивость содержания микроэлементов, в том числе индикаторных — V и Ni. Так, содержание V изменяется более чем на порядок — от 1,2 до 35 мкг/см³. Вероятно, состав попутного нефтяного газа на Ватинском месторождении отличается малым содержанием V и значительным участием Ni, о чём свидетельствует рост концентрации Ni в растворённой и взвешенной формах и крайне низкое содержание V более чем в 50% проб, не превышающее предел обнаружения (см. табл. 2).

Значения суммарного показателя загрязнения на территории месторождения изменяются от 1 до 41 (среднее 10). Преобладает низкий, неопасный уровень загрязнения ($Z_c < 32$). В двух пунктах опробования, расположенных в южной части месторождения, значения Z_c лежат в диапазоне 32–64, что соответствует умеренно опасному уровню загрязнения (Касимов и др., 2012). Рост значений Z_c связан с высоким содержанием Zn и Ni (рис. 4). Именно в южной части месторождения сосредоточены основные объекты

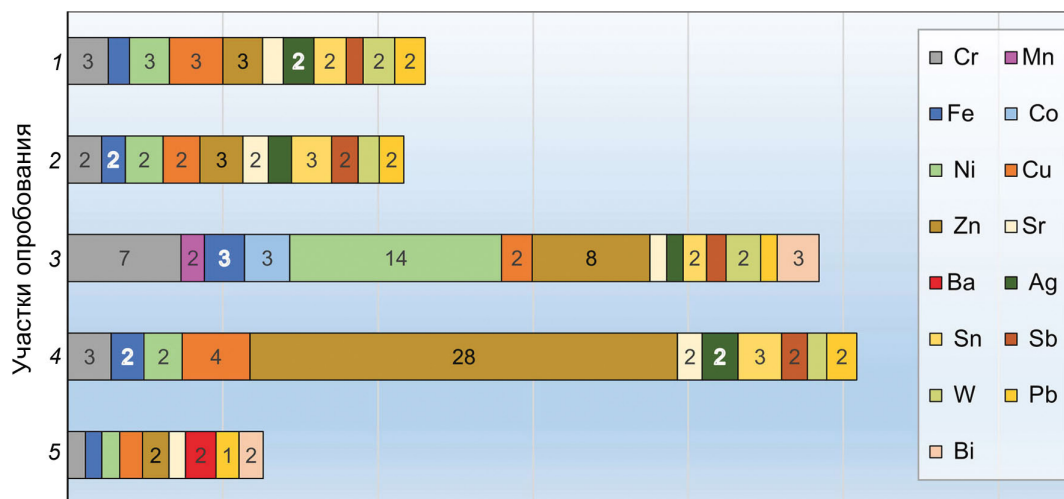


Рис. 4. Значения коэффициентов концентрации металлов и металлоидов K_c в снеговой пыли на участках с различными промышленными объектами:

1 — куст эксплуатационных скважин; 2 — дожимная насосная станция; 3 — разведочная скважина, кусты эксплуатационных скважин, автодорога; 4 — эксплуатационные кусты, коридор коммуникаций, дожимная насосная станция; 5 — куст эксплуатационных скважин

Fig. 4. Concentration factors (CF) at sites with various industrial facilities:

1 — production well pad; 2 — booster pumping station; 3 — exploration drill hole, production wells pads, highway; 4 — production wells pads, communications corridor, booster pumping station; 5 — production well pad

Таблица 3. Результаты факторного анализа элементного состава твёрдой фракции снега на Ватинском месторождении (метод главных компонент)*

Элементы	Первый фактор	Второй фактор	Третий фактор
Li	0,50	–0,38	–0,49
Ti	–0,75	–0,44	–0,21
Cr	0,58	–0,70	0,30
Mn	–0,59	–0,60	–0,40
Fe	0,31	–0,80	–0,25
Co	–0,09	–0,91	0,04
Ni	0,37	–0,84	0,24
Cu	0,94	0,13	–0,04
Zn	0,69	–0,10	–0,24
Sr	0,27	–0,07	–0,86
Ag	0,94	0,19	–0,01
Cd	–0,46	–0,07	–0,41
Sn	0,91	0,07	–0,03
Sb	0,92	–0,14	–0,04
Ba	–0,36	–0,08	–0,37
W	0,56	–0,48	0,44
Hg	–0,60	–0,03	0,64
Pb	0,31	0,14	–0,75
Bi	–0,46	–0,53	0,35
<i>Pn</i> (пылевая нагрузка)	–0,74	–0,19	–0,55
Вклад фактора в общую дисперсию	7,63	4,03	3,34
Доля дисперсий главных компонент	0,39	0,20	0,17

*Факторный анализ выполнен методом главных компонент; выделены значения $> 0,7$.

инфраструктуры и проходит коридор коммуникаций, включая автомобильную и железную дороги, магистральные трубопроводы, что позволяет связать рост содержания Zn и Ni с воздействием транспорта. Cr и Ni накапливаются вблизи добывающих и разведочных скважин, индицируя поступление этих элементов в результате буровых работ. Значения суммарного показателя выпадения элементов Zd на территории месторождения изменяются от 2 до 33, что соответствует низкому уровню загрязнения с неопасной экологической ситуацией ($Zd < 1000$). Низкие значения Zd связаны со слабой пылевой нагрузкой.

Для выявления геохимических ассоциаций элементов в снеговой пыли проведён факторный анализ (табл. 3). Полученные результаты позволили выделить три фактора, определяю-

щих закономерности формирования химического состава снеговой пыли и в совокупности определяющие 76% варьирования всех переменных. *Первый фактор* (39% суммарной дисперсии) объединяет Cu, Sn, Sb, Ag (положительные значения), Ti и величину пылевой нагрузки (отрицательные значения). К данному фактору относятся халькофильные элементы, которые в составе аэрозолей переносятся на большие расстояния и считаются загрязнителями в глобальном масштабе. Повышенная концентрация этих элементов наблюдается при пониженной пылевой нагрузке, поскольку наиболее обогащены этими элементами субмикронные частицы. *Второй фактор* (20% суммарной дисперсии) связывает Cr, Ni, Fe и Co. Рост содержания этих элементов в районе размещения скважин позволяет связать данный фактор с буровыми работами. Влияние этого фактора, судя по вкладу в суммарную дисперсию, выражено слабее фактора дальнего переноса загрязнителей. *Третий фактор*, содержащий самый слабый вклад в суммарную дисперсию (17%), связывает содержание Pb и Sr. Слабое загрязнение этими элементами отмечено вблизи коридора коммуникаций, в котором проходят автомобильная и железная дороги, а также трубопроводы, что указывает на их транспортную природу. Таким образом, парагенетические ассоциации индицируют источники поступления металлов в снежную пыль: для Zn, Cu, Sn и Sb – влияние дальнего переноса, для Ni и Cr – буровые работы.

Выводы

Как на фоновой территории, так и на месторождении снег имеет кислую реакцию. Величина пылевой нагрузки меньше, чем на сопредельных территориях Западной Сибири. Нерастворимая фаза снега на фоновом участке обогащена халькофильными элементами, что типично для фоновых территорий Земли и зависит от процессов дальнего переноса воздушных масс. Ассоциация элементов-загрязнителей на Ватинском месторождении включает в себя Ni, Zn, Cu и Cr. Ni поступает как в составе твёрдофазной составляющей, так и в растворённой форме. Zn, Cu и Cr поступает с нерастворимыми частицами. Источник поступления Ni и Cr –

буровые работы, повышенного содержания Zn и Cu — районы размещения факелов сжигания попутного газа. Степень обогащения выпадений из атмосферы металлами и металлоидами, согласно результатам вычисления суммарного показателя загрязнения Zс, в большинстве пунктов опробования меньше 32, что соответствует низкому, неопасному уровню. Максимальная концентрация элементов отмечена в нерастворимом осадке снега на участке с высокой плотностью размещения объектов инфраструктуры месторождения. Из-за незначительной пылевой нагрузки интенсивность атмосферного выпадения элементов низкая, все значения коэффициента

выпадения элементов Zd соответствуют низкому уровню загрязнения.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19–05–50062 «Эколого-геохимическая оценка выпадений снеговой и дорожной пыли в северных районах Западной Сибири», и госзадания ТюмНЦ СО РАН № 121041600045–8.

Acknowledgments. This research was funded by the Russian Foundation for Basic Research (project № 19–05–50062) and project № 121041600045–8 Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.

Литература

References

- Алтунина Л.К., Сваровская Л.И., Ященко И.Г., Алексеева М.Н. Загрязнение окружающей среды при сжигании попутного нефтяного газа на территории нефтедобывающих предприятий // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2014. № 22. С. 217–222.
- Большунова Т.С. Оценка степени трансформации природной среды в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области по данным изучения снегового покрова и лишайников-эпифитов. Автореф. дис. на соиск. уч. степ. канд. геогр. наук: Томский нац. исслед. политех. ун-т, 2015. 21 с.
- Василенко В.Н., Артемов И.Е., Беликова Т.В., Успен А.А. Кислотно-щелочные характеристики снежного покрова территории России // *Метеорология и гидрология*. 2007. № 4. С. 100–104. doi: 10.3103/S1068373907040097.
- Водяницкий Ю.Н., Савичев А.Т., Трофимов С.Я., Шишконокова Е.А. Накопление тяжёлых металлов в загрязнённых нефтью торфяных почвах // *Почвоведение*. 2012. № 10. С. 1109–1114.
- Ермолов Ю.В., Смоленцев Н.Б. Зимний фоновый сток примесей атмосферы на юго-востоке Западной Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33. № 1 (372). С. 75–81. doi: 10.15372/AOO20200111.
- Карандашев В.К., Хвостиков В.А., Носенко С.Ю., Бурмий Ж.П. Использование высокообогащенных стабильных изотопов в массовом анализе образцов горных пород, грунтов, почв и донных отложений методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2016. Т. 82. № 7. С. 6–15.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы // *Вестн. МГУ. Сер. 5: География*. 2012. № 4. С. 14–24.
- Литау В.В., Таловская А.В., Язиков Е.Г., Лончакова А.Д., Третьякова М.И. Оценка пылевого загрязнения атмосферы г. Омска по данным снеговой съемки // *Оптика атмосферы и океана*. 2015. Т. 28. № 3. С. 256–259.
- Межибор А.М., Большунова Т.С. Биогеохимическая характеристика сфагновых мхов и эпифитных ли-
- Altunina L.K., Svarovskaya L.I., Yashchenko I.G., Alekseyeva M.N. Environmental pollution caused by associated petroleum gas combustion at the territory of oil producing enterprises. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. Chemistry for sustainable development. 2014, 22 (3): 217–222. [In Russian].
- Bol'shunova T.S. Assessment of the degree of transformation of the natural environment in the areas of the oil and gas production complex of the Tomsk region according to the study of snow cover and lichen-epiphytes. PhD-thesis. Tomsk: TGU, 2015: 21 p. [In Russian].
- Vasilenko V.N., Artemov I.E., Belikova T.V., Usdin A.A. Acid-base characteristics of Russian snow cover. *Meteorologiya i gidrologiya*. Russian meteorology and hydrology. 2007, 4: 100–104. doi: 10.3103/S1068373907040097. [In Russian].
- Vodyanikij Yu.N., Savichev A.T., Trofimov S.Ya., Shishkonakova E.A. Accumulation of heavy metals in oil-contaminated peat soils. *Pochvovedenie*. Eurasian Soil Science. 2012, 10: 1109–1114. [In Russian].
- Yermolov Yu.V., Smolentsev N.B. Winter background aerosol deposition in the south-eastern part of Western Siberia. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2020, 33 (1-372): 75–81. doi: 10.15372/AOO20200111. [In Russian].
- Karandashev V.K., Khvostikov V.A., Nosenko S.Yu., Burmiy Zh.P. The use of highly enriched stable isotopes in the mass analysis of samples of rocks, soils, soils and bottom sediments by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. Factory laboratory. Diagnostics of materials. 2016, 82 (7): 6–15. [In Russian].
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Tverskaya E.V. Geochemistry of snow cover in the Eastern district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. Moscow University Bull. Series 5: Geography. 2012, 4: 14–24. [In Russian].
- Litau V.V., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Lonchakova A.D., Tretyakova M.I. Dust pollution assessment on the territory of Omsk city using snow survey. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2015, 28 (3): 256–259. [In Russian].

- шайников в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области // Изв. Томского политех. ун-та. 2014. Т. 325. № 1. С. 205–213.
- Моисеев Т.И., Гашкина Н.А., Дину М.И., Хорошавин В.Ю., Кремлева Т.А. Влияние природных и антропогенных факторов на процессы закисления вод в гумидных регионах // Геохимия. 2017. № 1. С. 41–56. doi: 10.7868/S0016752516120104.
- Московченко Д.В., Бабушкин А.Г. Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 1. С. 71–81.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Курчатова А.Н., Тимшанов Р.И. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени // Вестн. МГУ. Сер. 5: География. 2021. № 3. С. 13–26.
- Опекунова М.Г., Опекунов А.Ю., Кукушкин С.Ю., Ганул А.Г. Фоновое содержание химических элементов в почвах и донных осадках севера Западной Сибири // Почвоведение. 2019. № 4. С. 422–439. doi: 10.1134/S0032180X19020114.
- Пожитков Р.Ю., Тигеев А.А., Московченко Д.В. Оценка пылевых выпадений в снежном покрове с использованием данных дистанционного зондирования Земли (на примере г. Нижневартовска) // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. № 10. С. 767–773. doi: 10.15372/AOO20201004.
- Саэт 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. Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1990. 335 с.
- Таловская А.В., Симоненков Д.В., Филимоненко Е.А., Белан Б.Д., Язиков Е.Г., Рычкова Д.А., Ильенок С.С. Исследование состава пылевого аэрозоля на фоновой и городской станциях наблюдения в Томском регионе зимой 2012/13 г. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 11. С. 999–1005.
- Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова). Дис. на соиск. уч. степ. д-ра геол.-минер. наук. Томск: Нац. исслед. Томский политех. ун-т, 2022. 373 с.
- Токарева О.С., Полищук Ю.М. Оценка экологического риска воздействия атмосферного загрязнения на растительность // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 8. С. 717–721.
- Филимоненко Е.А. Эколого-геохимическая обстановка в районах расположения объектов теплоэнергетики по данным изучения нерастворимой и растворимой фаз снега (на примере Томской области). Дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минер. наук. Томск: Нац. исслед. Том. политех. ун-т, 2015. 152 с.
- Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р., Горюнова Н.В., Ключевкин А.А., Кравчишина М.Д., Кривс М., Новигатский А.Н., Соколов В.Т., Филиппов А.С., Хаас Х. Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 1 (75). С. 106–118.
- Янченко Н.И. Практика отбора проб снежного покрова для химического анализа // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2020. Т. 331. № 12. С. 94–104. doi: 10.18799/24131830/2020/12/2943.
- Mezhibor A.M., Bolshunova T.S. Biogeochemical characteristics of sphagnum mosses and epiphytic lichens in the areas of the oil and gas complex of the Tomsk region. *Izvestiya Tomskogo politechnicheskogo universiteta*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University 2014, 325 (1): 205–213. [In Russian].
- Moiseyenko T.I., Gashkina N.A., Dinu M.I., Khoroshavin V.Yu., Kremleva T.A. Influence of natural and anthropogenic factors on water acidification in humid regions. *Geohimiya*. Geochemistry. 2017, 1: 41–56. doi: 10.7868/S0016752516120104. [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Features of formation of the chemical composition of snow cover on the territory of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2012, XXVI (2): 71–81. [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Pojtkov R.Yu., Kurchatova A.N., Timshanov R.I. Geochemistry of snow cover within the Tyumen city. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. Moscow University Bulletin. Series 5: Geography. 2021, 3: 13–26. [In Russian].
- Opekunova M.G., Opekunov A.Yu., Kukushkin S.Yu., Ganul A.G. Background contents of heavy metals in soils and bottom sediments in the north of Western Siberia. *Pochvovedenie*. Eurasian Soil Science. 2019, 4: 422–439. doi: 10.1134/S0032180X19020114. [In Russian].
- Pojtkov R.Yu., Tigeev A.A., Moskovchenko D.V. Assessment of dust fallout in the snow cover using remote sensing data: the case of Nizhnevartovsk. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2020, 33 (10): 767–773. doi: 10.15372/AOO20201004. [In Russian].
- Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. *Geohimiya okruzhayushchej sredy*. Geochemistry of the environment. Moscow: Nedra, 1990: 335 p. [In Russian].
- Talovskaya A.V., Simonenkov D.V., Filimonenko E.A., Belan B.D., Yazikov E.G., Rychkova D.A., Ilyenok S.S. Study of aerosol composition in tomsk region background and urban stations (the winter period 2012/13). *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2014, 27 (11): 999–1005. [In Russian].
- Talovskaya A.V. *Ekogeokhimiya atmosferykh aerozoley na urbanizirovannykh territoriyakh yuga Sibiri (po dannym izucheniya sostava nerastvorimogo osadka snegovogo pokrova)*. Ecogeochemistry of atmospheric aerosols in the urbanized territories of southern Siberia (on the basis of chemical composition of snow particulate matter). PhD. Tomsk: TGU, 2022: 373 p.
- Tokareva O.S., Polishchuk Yu.M. Assessment of environmental risk of pollution air impact on vegetation. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2011, 24 (8): 75–81. [In Russian].
- Filimonenko E.A. *Ekologo-geokhimicheskaya obstanovka v rayonakh raspolozheniya ob"ektov teploenergetiki po dannym izucheniya nerastvorimoy i rastvorimoy faz snega (na primere Tomskoy oblasti)*. Ecological and geochemical situation in the areas of thermal power facilities according to the study of insoluble and soluble phases of snow (on the example of the Tomsk region). PhD. Tomsk: TGU, 2015: 152 p. [In Russian].
- Shevchenko, V.P., Lisitsyn, A.P., Stein, R., Goryunova N.V., Klyuviikin A.A., Kravchishina M.D., Crews M., Novigatsky A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H. Distribution and composition of insoluble particles in Arctic

- Яценко И.Г., Сваровская Л.И., Алексеева М.Н. Оценка экологического риска сжигания попутного нефтяного газа в Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 6. С. 560–564.
- Begak O.Y., Syroezhko A.M. Identification of oil pollution sources by a set of modern instrumental methods // Journ. of Appl. Chemistry. 2001. V. 74. P. 784–787. doi: 10.1023/A:1012745001700.
- Desboeufs K., Sofikitis A., Losno R., Colin J., Ausset P. Dissolution and solubility of trace metals from natural and anthropogenic aerosol particulate matter // Chemosphere. 2005. V. 58. P. 195–203. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.02.025.
- Karandashev V.K., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvitina I.R., Turanov A.N. Use of the inductively coupled plasma mass spectrometry for element analysis of environmental objects // Inorganic Materials. 2008. V. 44. P. 1491–1500. doi: 10.1134/S0020168508140045
- Kuznetsova V.P. The reaction of the environment to climate change in the Northern latitudes (on the example of the taiga zone of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra) // Environmental dynamics and global climate change. 2020. V. 11. № 2. P. 24–36.
- Li T., Wang Y., Li W.J., Chen J.M., Wang T., Wang W.X. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: regional sources and cloud processing // Atmos. Chem. Phys. 2015. V. 15. P. 8987–9002. doi: 10.5194/acp-15-8987-2015.
- Nriagu J.O., Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals // Nature. 1988. V. 333. P. 134–139.
- Pozhitkov R., Moskovchenko D., Soromotin A., Kudryavtsev A., Tomilova E. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. V. 192. № 4. P. 215–221. doi: 10.1007/s10661-020-8179-4.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust // Treatise on Geochemistry. 2003. V. 3. P. 1–64. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
- Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko V.A., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient // Hydrology and Earth System Sciences. 2017. V. 21. № 11. P. 5725–5746. doi: 10.5194/hess-21-5725-2017.
- Shevchenko V.P., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Boev A.G., Lim A.G., Novigatsky A.N., Starodymova D.P., Pokrovsky O.S. Insoluble Particles in the Snowpack of the Ob River Basin (Western Siberia) a 2800 km Submeridional Profile // Atmosphere. 2020. V. 11. p. 1184 doi: 10.3390/atmos11111184.
- Telmer K., Bonham-Carter G.F., Kliza D.A., Hall G.E.M. The atmospheric transport and deposition of smelter emissions: evidence from multi element geochemistry of snow, Quebec, Canada // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004. V. 68. № 14. P. 2961–2980. doi: 10.1016/j.gca.2003.12.022.
- snow. *Problemy Arktiki i Antarktiki*. Problems of the Arctic and Antarctic. 2007, 75: 106–118. [In Russian].
- Yanchenko N.I. Practice of snow cover sampling for chemical analysis. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov*. Bull. of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020, 331 (12): 94–104. doi: 10.18799/24131830/2020/12/2943. [In Russian].
- Yashchenko I.G., Svarovskaya L.I., Alekseyeva M.N. Assessment of environmental risk associated with gas flaring in Western Siberia. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2014. 27 (6): 560–564. [In Russian].
- Begak O.Y., Syroezhko A.M. Identification of oil pollution sources by a set of modern instrumental methods. Journ. of Appl. Chemistry. 2001, 74: 784–787. doi: 10.1023/A:1012745001700.
- Desboeufs K., Sofikitis A., Losno R., Colin J., Ausset P. Dissolution and solubility of trace metals from natural and anthropogenic aerosol particulate matter. Chemosphere. 2005, 58: 195–203. doi: 10.1016/j.chemosphere.2004.02.025.
- Karandashev V.K., Orlova T.A., Lezhnev A.E., Nosenko S.V., Zolotareva N.I., Moskvitina I.R., Turanov A.N. Use of the inductively coupled plasma mass spectrometry for element analysis of environmental objects. Inorg Mater. 2008, 44: 1491–1500. doi: 10.1134/S0020168508140045.
- Kuznetsova V.P. The reaction of the environment to climate change in the Northern latitudes (on the example of the taiga zone of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra. Environmental dynamics and global climate change. 2020, 11 (2): 24–36.
- Li T., Wang Y., Li W.J., Chen J.M., Wang T., Wang W.X. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: regional sources and cloud processing. Atmos. Chem. Phys. 2015, 15: 8987–9002. doi: 10.5194/acp-15-8987-2015.
- Nriagu J.O., Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. Nature. 1988, 333: 134–139.
- Pozhitkov R.Yu., Moskovchenko D.V., Soromotin A.V., Kudryavtsev A.A., Tomilova E.V. Trace elements composition of surface snow in the polar zone of northwestern Siberia: the impact of urban and industrial emissions. Environmental Monitoring and Assessment. 2020, 192 (4): 215–221. doi: 10.1007/s10661-020-8179-4.
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental crust. Treatise on Geochemistry. The Crust. Elsevier Sci., 2003, 3: 1–64. doi: 10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6.
- Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko V.A., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient. Hydrology and Earth System Sciences. 2017, 21 (11): 5725–5746. doi: 10.5194/hess-21-5725-2017.
- Shevchenko V.P., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Boev A.G., Lim A.G., Novigatsky A.N., Starodymova D.P., Pokrovsky O.S. Insoluble Particles in the Snowpack of the Ob River Basin (Western Siberia) a 2800 km Submeridional Profile. Atmosphere. 2020, 11: 1184. doi: 10.3390/atmos11111184.
- Telmer K., Bonham-Carter G.F., Kliza D.A., Hall G.E.M. The atmospheric transport and deposition of smelter emissions: evidence from multi element geochemistry of snow, Quebec, Canada. Geochimica et Cosmochimica Acta. 2004, 68 (14): 2961–2980. doi: 10.1016/j.gca.2003.12.022.