

РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНЕГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ СНЕГА НА НЕФТЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ХМАО – ЮГРЫ

© 2025 г. Д. В. Московченко^{1,*}, А. Г. Бабушкин¹, М. Н. Топтыгина²

¹Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень, Россия

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

*e-mail: moskovchenko1965@gmail.com

Поступила в редакцию 29.04.2025 г.

После доработки 17.06.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

По данным экологического мониторинга на нефтяных месторождениях ХМАО – Югры за период 2015–2023 гг. определены показатели химического состава снега – содержание тяжёлых металлов (Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn), аммонийного и нитратного азота, нефтяных углеводородов, хлоридов, сульфатов и величина pH. Содержание аммонийного азота в снеге было на фоновом уровне, а содержание нитратного азота – повышенным. Выявлено подкисление атмосферных осадков. На локальных участках отмечено загрязнение снеготалых вод нефтяными углеводородами. Из тяжёлых металлов наиболее часто наблюдается загрязнение Zn и Cr. Для определения источников загрязнения проведён корреляционный анализ, установивший зависимость между составом снега и отдельными показателями техногенеза. Величина pH снеготалых вод связана отрицательной зависимостью с количеством факелов сжигания попутного нефтяного газа. Отмечена слабая положительная корреляция содержания нефтяных углеводородов с показателями аварийности на трубопроводах. Содержание Zn зависит от количества отходов бурения и определяется интенсивностью буровых работ. Сделан вывод, что состав снега оказывает влияние на экологическое состояние поверхностных вод: снеготаяние вызывает рост содержания нитратного азота и локальное повышение концентрации нефтяных углеводородов. Для определения трендов загрязнения атмосферы проведено сопоставление результатов мониторинга 2015–2023 гг. с данными 2005–2010 гг. Отмечено снижение содержания в снеге хлоридов, сульфатов, нитратов, нефтепродуктов и железа как следствие сокращения объёмов сожженного в факелах попутного нефтяного газа, снижения аварийности на трубопроводах.

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

DOI: 10.7868/S2412376525040061

ВВЕДЕНИЕ

Разработка месторождений углеводородов сопровождается поступлением в окружающую среду большого количества твёрдых, жидких и газообразных загрязнителей. На территории ХМАО – Югры, основного нефтедобывающего региона Российской Федерации, выбросы загрязняющих веществ в атмосферу за год составляют 1.2 млн т, из которых 70–80 % приходится на добычу полезных ископаемых (Доклад..., 2024). Состав загрязнителей, распространяющихся атмосферным путём на нефтяных месторождениях,

достаточно хорошо исследован. Неоднократно отмечался рост аэротехногенного поступления тяжёлых металлов от объектов промышленной и транспортной инфраструктуры (Дорожкова, 2004; Башкин, 2017; Московченко и др., 2022). Факелы сжигания попутного нефтяного газа – источники соединений азота и серы (Рапута и др., 2000). К числу приоритетных загрязнителей в районах, подверженных воздействию нефтегазодобывающих предприятий, относятся нефтепродукты и фенолы (Большунова, 2015), установлено также формирование контрастных геохимических ореолов натрия (Таловская, 2022).

Оценить состав и количество загрязняющих веществ, поступающих из атмосферы, можно путём изучения состава снежного покрова. Пространственный геохимический анализ аномалий поллютантов в снеге даёт интегральную оценку состояния атмосферы за холодный период (Касимов и др., 2016). Интенсивное выпадение загрязнителей из атмосферы на месторождениях углеводородов определяет актуальность использования снега в качестве объекта эколого-геохимического мониторинга в нефтедобывающих регионах.

Добыча нефти и газа в Западной Сибири происходит в сложных природных условиях, увеличивающих риск техногенных аварий. Северные экосистемы неустойчивы к различным формам воздействия, в том числе к химическому загрязнению. Это обусловило необходимость контроля за состоянием природной среды региона. На месторождениях ХМАО – Югры недропользователи, в соответствии с региональными нормативно-правовыми актами (Постановление..., 2011), обязаны организовать систему регулярных наблюдений за состоянием природной среды – локальный экологический мониторинг (далее – ЛЭМ). В настоящее время на территории ХМАО – Югры насчитывается более 300 лицензионных участков нефтедобычи (далее – ЛУ), на которых регулярно проводится опробование поверхностных вод и донных отложений, атмосферного воздуха, снежного покрова и почв.

Систематические наблюдения за составом снега на месторождениях ХМАО – Югры проводятся с начала 2000-х годов. Уже на начальном этапе наблюдений выявлена высокая информативность снега для оценки экологической ситуации. Обобщение данных мониторинга показало, что под влиянием объектов нефтедобычи в снеге увеличивается содержание нитратного азота и тяжёлых металлов (Московченко, Бабушкин, 2012). За прошедшие годы массив данных о составе снега был значительно дополнен. Цель исследования – дать экологическую оценку атмосферных выпадений на нефтяных месторождениях ХМАО – Югры: их состав, интенсивность и уровень экологической опасности, определить основные источники поступления.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой для исследования послужили данные, полученные недропользователями в ходе экологического мониторинга на лицензионных

участках ХМАО – Югры за период 2015–2023 гг. Все работы проводилось в соответствии с постановлением Правительства ХМАО – Югры (Постановление..., 2011), которое определяет требования к размещению и количеству постов мониторинга, периодичности отбора проб, перечню измеряемых показателей. На каждом лицензионном участке, в зависимости от его размера и количества объектов промышленной и транспортной инфраструктуры, размещено от 1 до 20 пунктов мониторинга. Пункты наблюдений организованы с учётом РД 52.04.186–89 “Руководство по контролю загрязнения атмосферы”, РД 52.4.2–94 “Методические указания. Охрана природы. Комплексное обследование загрязнения природных сред промышленных районов с интенсивной антропогенной нагрузкой”. Геохимическое опробование снежного покрова проводилось в районах расположения крупных промышленных площадок, имеющих стационарные источники выбросов 1 раз в год в период максимального влагозапаса (март–апрель). Все химические анализы проведены в аккредитованных лабораториях по методикам, внесённым в федеральный перечень и допущенных к применению при выполнении работ в области мониторинга загрязнения окружающей природной среды.

Массив данных содержит информацию по 1320 пунктам мониторинга, расположение которых представлено на рис. 1. В пробах, в соответствии с правилами ЛЭМ (Постановление..., 2011), определено содержание тяжёлых металлов (Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn), ионов аммония, нитрат-ионов, нефтяных углеводородов (далее – НУВ), хлоридов, сульфатов и величина pH.

Количественные показатели массива данных (общее число измерений, число измерений, где содержание вещества было ниже предела обнаружения), и методы анализов представлены в табл. 1. Содержание некоторых тяжёлых металлов (Ni, Pb, Fe, Cr) и НУВ было ниже предела обнаружения (далее – ПО) более чем в 50 % проанализированных пробах. Поэтому вычисление статистических показателей (среднего, варьирования и т.д.) для этих веществ не проводилось. Для остальных показателей (pH, NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Zn, Mn) при вычислении статистических характеристик использовалась половинное значение ПО.

Для оценки соотношения природных и антропогенных источников поступления тяжёлых металлов вычислены значения коэффициента обогащения (далее – КО):

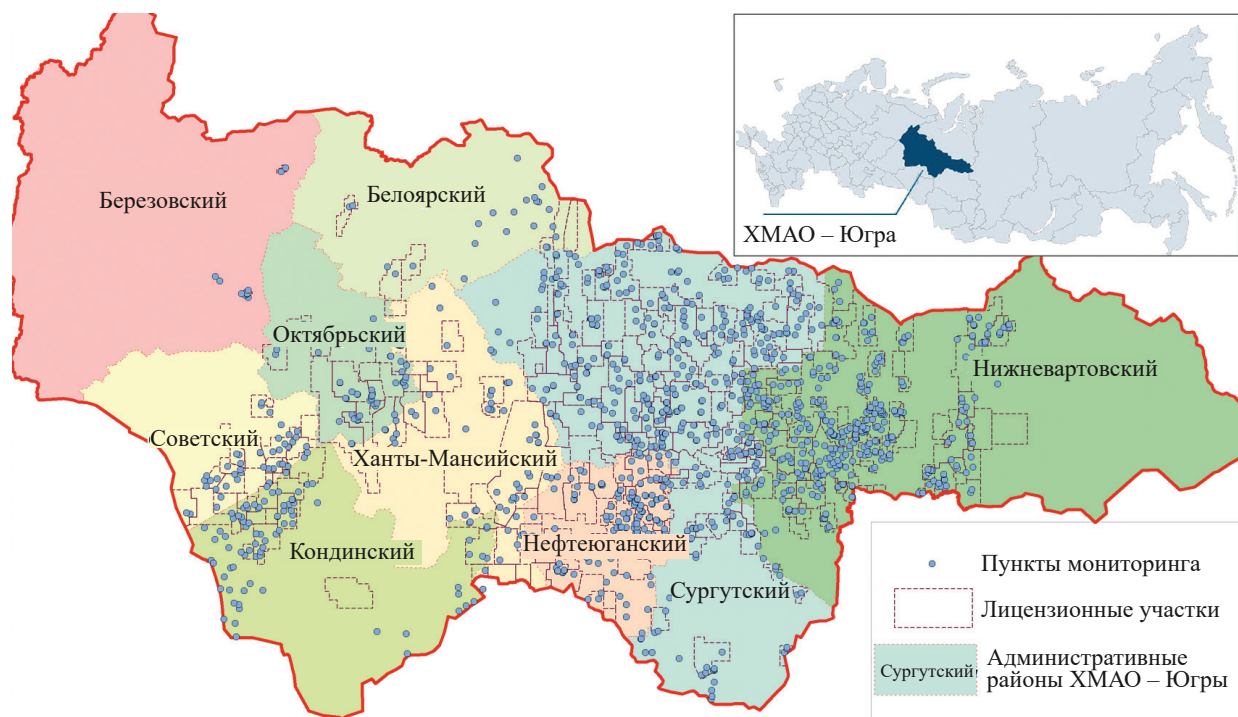


Рис. 1. Схема района работ

Fig. 1. Study area

Таблица 1. Число замеров, пределы обнаружения, методы анализов

Table 1. Number of measurements, detection limits, analysis methods

Показатель	Количество измерений	Количество измерений <ПО		Методы анализов и нормативные документы
		замеры	%	
рН	7861	0	0.0	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97 ФР.1.31.2024.50028
Хлориды	7865	2233	28.4	Метод ионной хроматографии ФР 1.31.2019.32441
Сульфаты	7857	2576	32.8	Метод ионной хроматографии ФР 1.31.2019.32441
Аммонийный азот	7862	2034	25.9	Метод ионной хроматографии ФР.1.31.2016.22545
Нитратный азот	7795	427	5.5	Метод ионной хроматографии ФР 1.31.2019.32441
Нефтепродукты	7867	4981	63.3	ИК-спектрофотометрический ФР.1.31.2010.07432 (ПНД Ф 14.1:2:4.168-2000)
Fe	7865	4419	56.2	1. Атомно-абсорбционный
Mn	7866	3655	46.5	ФР.1.31.2016.22894
Ni	7870	7494	95.2	ФР.1.31.2014.16963
Pb	7862	4674	59.5	РД 52.44.594-2016
Cr	7866	6887	87.6	ФР.1.31.2016.25408
Zn	7869	2918	37.1	2. Атомно-эмиссионная спектрофотометрия; ПНД Ф 14.1:2:4.135-98, Р.1.31.2000.00132

$$КО = \frac{(Ci/C_{Fe})_{\text{проба снега}}}{(Ci/C_{Fe})_{\text{Земная кора}}}. \quad (1)$$

Были взяты кларки верхней части континентальной земной коры по (Rudnick, Gao, 2003). При значении $КО < 10$ элемент поступает из природных источников, значения $10 < КО < 100$ индицируют смешанный, природно-антропогенный характер выпадений, значения $КО > 100$ свидетельствуют о преобладании техногенных источников (Li et al., 2015).

Для определения источников загрязнения при нефтедобыче применён следующий подход. Для каждого административного района ХМАО – Югры вычислены усреднённые показатели состава снежного покрова. Затем получены данные о количестве объектов инфраструктуры, являющихся источниками загрязнения (количество скважин, кустовых площадок, дожимных насосных станций (далее – ДНС), объектов подготовки нефти, протяжённость автодорог, объёмы отходов бурения) и о показателях аварийности (число аварий и масса загрязняющих веществ). Затем проведён корреляционный анализ для установления зависимостей между показателями состава снега и показателями техногенеза (вычислены коэффициенты ранговой корреляции Спирмена). Для определения тенденций изменения состава снежного покрова проведено сопоставление результатов мониторинга, полученных в 2005–2010 гг., с результатами 2015–2023 гг.

Для оценки уровня загрязнения и его экологической опасности применяли следующие показатели: коэффициент концентрации

$$Kc = \frac{C}{C_{\Phi}}, \quad (2)$$

где C – концентрация элемента в снеге на ЛУ; C_{Φ} – фоновая концентрация; индекс нагрузки Томилисона PLI (Tomlinson et al., 1980), который можно применять в качестве стандартизованного способа обнаружения загрязнения различных природных сред и сравнивать уровни загрязнения между различными участками и в разное время (Angulo 1996):

$$PLI = (Kc1 \times Kc2 \times \dots Kcn)^{1/n}. \quad (3)$$

Для оценки степени загрязнения отдельными веществами применён геоаккумуляционный индекс $Igeo$ (Müller, 1969)

$$Igeo = \log_2[Kc]. \quad (4)$$

Индексы PLI и $Igeo$ используются при анализе загрязнения атмосферных осадков (Salo et al., 2016; Ushakova et al., 2023; Salih et al., 2024). Значение $PLI > 1.0$ свидетельствует о наличии загрязнения (Tomlinson et al., 1980). При значениях $Igeo < 1$ загрязнение слабое либо отсутствует, в диапазоне $Igeo = 1–2$ уровень загрязнения умеренный, $2–3$ – повышенный, $3–4$ – высокий, $4–5$ – очень высокий, > 5 – экстремальный.

В качестве фоновых значений выступают материалы региональных обобщений: данные о суммарном содержании растворённой и взвешенной форм металлов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири (Ермолов и др., 2014), данные о содержании ионов Cl^- и SO_4^{2-} в снежном покрове таёжной и тундровой зон на участке от Томска до Ямбурга (Shevchenko et al., 2017) и о фоновых концентрациях НУВ, нитратного и аммонийного азота для фоновых участков ХМАО – Югры (Московченко, Бабушкин, 2012).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Основные показатели состава снежного покрова. Результаты статистической обработки данных приведены в табл. 2. Величина водородного показателя изменялась в широких пределах – от 3.11 до 9.55. Среднее значение pH составило 5.58 единиц, т.е. было близко к равновесному отношению $pH \approx 5.6$. Считается, что атмосферные осадки относятся к природно-нейтральным при значениях $pH = 5–7$ (Обзор..., 2022). В данном интервале лежит 60 % проанализированных проб, 35 % относятся к кислым, 5 % имеют щелочную реакцию (рис. 2).

Наблюдаются два пика частоты распределения – 4.5–5 и 5–6.5 единиц pH . При этом в диапазоне 5.5–6.0, близком к равновесному отношению, находится относительно небольшое число проб. Подобное распределение свидетельствует о влиянии двух факторов, определяющих кислотно-щелочные условия, которые можно интерпретировать как факторы подкисления и подщелачивания. Одна из причин подкисления атмосферных осадков в Западной Сибири – сжигание попутного газа на нефтедобывающих производствах (Моисеенко и др., 2017), которое приводит к выпадению анионов NO_3^- и SO_4^{2-} . Подкисление атмосферных осадков на месторождениях ХМАО – Югры вследствие техногенных выбросов окислов азота и серы доказывает наличие корреляционных связей между pH , NO_3^- и SO_4^{2-} . Подсчёт коэффициентов корреляции показал статистически

Таблица 2. Статистические показатели химического состав снеговых вод на лицензионных участках ХМАО – Югры, 2015–2023 гг.**Table 2.** Statistical indicators of the chemical composition of snowmelt water in licensed areas of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, 2015–2023

Показатель	M	SD	Me	min	max	Фон
pH	5.58	0.82	5.40	3.11	9.55	5.44 ¹
Аммонийный азот, мг/л	0.23	0.28	0.17	<0.05	5.0	0.23 ²
Нитратный азот, мг/л	1.03	0.74	1.09	<0.05	9.95	0.45 ²
Cl ⁻ , мг/л	1.42	3.0	1.0	<0.1	91	0.48 ¹
SO ₄ ²⁻ , мг/л	1.31	1.83	0.75	<0.5	9.78	0.72 ¹
Zn, мкг/л	20.0	42.5	7.5	<1	840	5.2 ³
Mn, мкг/л	11.9	41.5	2.8	<1	410	5.4 ³

Примечание. ¹Shevchenko et al., 2017; ²Московченко, Бабушкин, 2012; ³Ермолов и др., 2014.

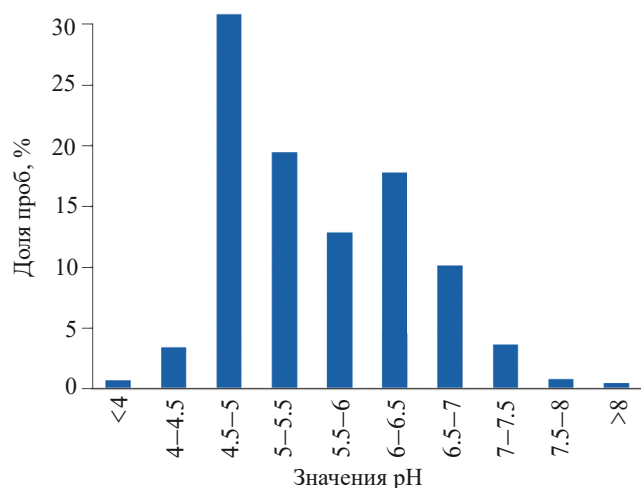


Рис. 2. Распределение pH по интервалам частот
Fig. 2. Distribution of pH values by frequency intervals

достоверную зависимость Н от NO₃⁻ ($r = -0.22$; $p < 0.01$). Влияние сульфатов слабее ($r = -0.10$; $p < 0.01$). На подщелачивание влияет аммоний-ион ($r = 0.18$; $p < 0.01$).

Другой фактор подкисления – крайне незначительное поступление веществ эрозийного и морского происхождения, за счёт которых происходит нейтрализация атмосферных осадков. При изоляции наземной поверхности снежными выпадениями местное поступление натрия, кальция, магния, калия резко снижается, что приводит к уменьшению их содержания в аэрозолях и осадках (Смоляков и др., 2000). На фоне крайне низкой минерализации и недостатка кислотных нейтрализаторов (главных

катионов и гидрокарбонатов) даже незначительное поступление анионов может вызвать сдвиг pH снега в кислую сторону.

Отмечено уменьшение значений pH в направлении с запада на восток (рис. 3, а). Минимальные значения выявлены в Сургутском и Нижневартовском административных районах, что может быть объяснено увеличением выброса подкислителей от объектов промышленной инфраструктуры, а также снижением поступления кислотных нейтрализаторов в восточных районах, где воздушные массы зимой находятся под влиянием Сибирского антициклона, что уменьшает поступление пылевых частиц эрозийного происхождения.

Подкисление снежных осадков на севере Западной Сибири неоднократно отмечалось исследователями. При изучении состава снега на широтном градиенте от г. Томска до тундр Тазовского полуострова среднее значение pH составило 5.11 единиц (Shevchenko et al., 2017). На сопредельной территории ЯНАО величина pH снеготалых вод варьирует в пределах 4.6–5.5 (Кобелев и др., 2019). Снижение pH снеготалых вод выявлено в Нижневартовском районе ХМАО – Югры (Пожитков и др., 2020) и на территории Томской области (Большунова, 2015). Подщелачивание происходит при поступлении карбонатной строительной пыли, также было отмечено на территории городов Западной Сибири и на нефтяных месторождениях вблизи посёлков и автодорог (Московченко, Бабушкин, 2012; Moskovchenko et al., 2022).

Среднее содержание NH₄⁺ в снеготалой воде составило 0.23 мг/л (медиана 0.17 мг/л),

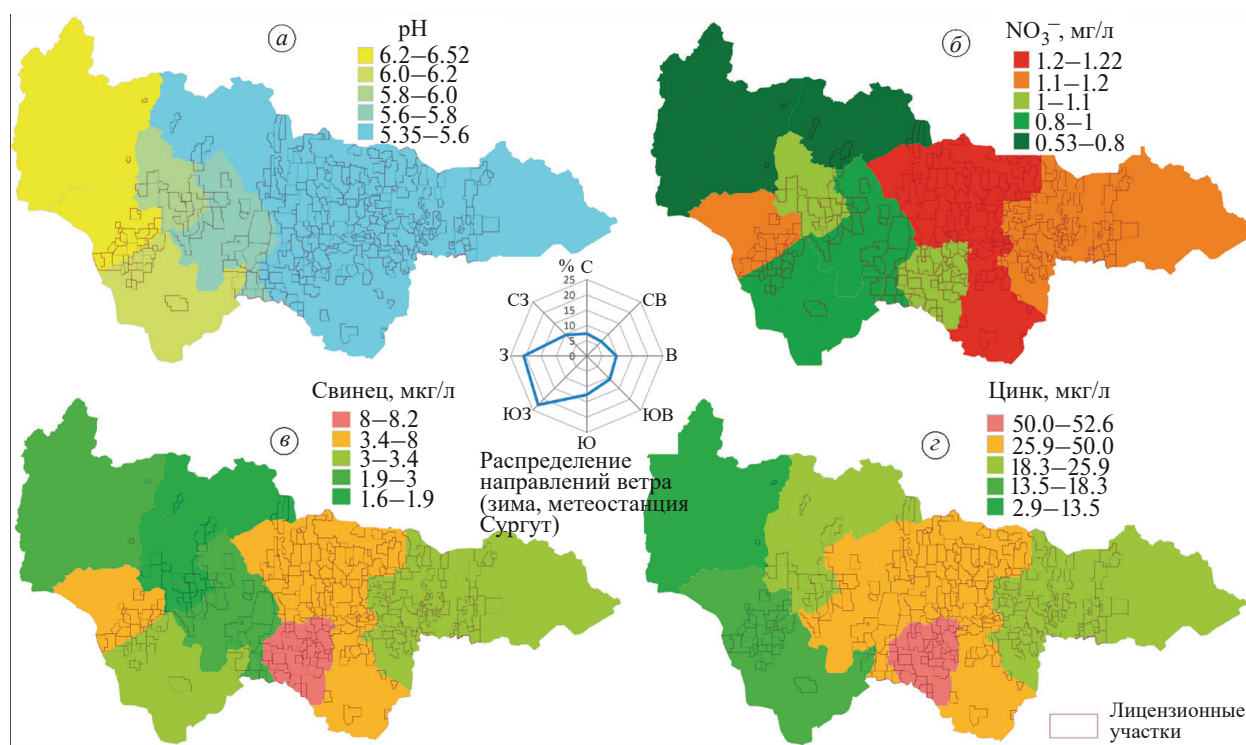


Рис. 3. Распределение показателей состава снежного покрова по административным районам ХМАО – Югры

Fig. 3. Spatial distribution of snow cover composition indicators by administrative districts of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra

NO_3^- 1.03 мг/л (медиана – 1.09 мг/л). В осадках фоновых станций Российской Федерации концентрация аммония составляет в среднем 0.4 мг/л (Обзор..., 2023). Среднее содержание NO_3^- в снежном покрове Арктики, что можно принять за фоновый уровень, составляло 0.26 мг/л (Caritat et al., 2005). Таким образом, концентрация NH_4^+ в снеге на месторождениях ХМАО – Югры была низкой, а нитратов, напротив, – повышенной. Высокий уровень содержания NO_3^- подтверждается и при сопоставлении с составом снега сопредельных регионов. Так, в республике Коми содержание NO_3^- в снеготалой воде изменялось от 0.18 до 0.34 мг/л (Василевич и др., 2011), в Томской области среднее содержание NO_3^- составило 0.98 мг/л (Савичев, Иванов, 2010), а на месторождениях Ямала – 0.22 мг/л (Грива, 2006). Максимальное содержание NO_3^- отмечено в Сургутском административном районе (см. рис. 3, б), для которого характерна самая высокая концентрация объектов нефтедобывающей инфраструктуры.

Экологическая опасность загрязнения снега состоит в изменении состава поверхностных вод при снеготаянии. На севере Западной Сибири основной источник питания рек – зимние

осадки, которые формируют до 70 % годового стока (Ресурсы..., 1973). По данным мониторинговых исследований, среднее содержание нитратов в воде рек ХМАО составляет 0.73 мг/л, медиана – 0.45 мг/л (Бабушкин и др., 2007), что значительно меньше выявленных значений содержания нитратов в снеге. В некоторых реках, в частности в р. Аган, наблюдается значительный рост нитратов в начале половодья (в июне), когда содержание NO_3^- достигает 1.2 мг/л (там же). Таким образом, снеготаяние приводит к росту содержания нитратного азота в поверхностных водах.

В соответствии с классификацией качества поверхностных вод суши (Оксиюк и др., 1993), снеготалые воды месторождений ХМАО – Югры относятся к разряду “сильно загрязнённых” по содержанию NO_3^- и “достаточно чистых” по содержанию NH_4^+ .

Концентрация сульфат-иона в снеговых водах изменялась от аналитического нуля до 9.7 мг/л. Среднее значение составило 1.3 мг/л, медиана – 0.75 мг/л. Полученные значения весьма низкие и соответствуют фоновому уровню содержания сульфатов в осадках. Так, на станциях фонового

мониторинга в азиатской части Российской Федерации средневзвешенные концентрации SO_4^{2-} составляли в период 2018–2022 гг. 1.07–2.86 мг/л (Обзор..., 2023). Низкое содержание сульфатов на севере Сибири связано со слабым влиянием континентальной пыли и аэрозолей вследствие сплошного залегания снежного покрова (Фотиев, 1999).

Содержание хлоридов составило в среднем 1.4 мг/л, медиана 1.0 мг/л. На фоновых континентальных участках Российской Федерации содержание Cl^- в осадках обычно не превышает 1 мг/л (Обзор..., 2023). Ранее в снежном покрове Западной Сибири среднее содержание хлоридов составило 0.48 мг/л (Shevchenko et al., 2017). Таким образом, содержание Cl^- на месторождениях ХМАО – Югры незначительно превышает региональный фоновый уровень. На нефтяных месторождениях ХМАО – Югры техногенными источниками хлоридов служат разливы высокоминерализованных пластовых вод. При сжигании попутного нефтяного газа также возможны выбросы хлоридов, перешедших из пластовых вод (Соловьянов, 2009).

Значения соотношения молярных концентраций эквивалента ионов $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$, как правило, лежат в диапазоне 1.0–2.5. Учитывая, что в арктическом снеге величина $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ составляет 17.7 и максимально приближена к соотношению в морской воде (Capitat et al., 2005), можно заключить, что снег на территории ХМАО – Югры формируется при слабом влиянии морских воздушных масс. Это не удивительно, учитывая преобладание ветров юго-западного и южного направлений в зимний период. Только в самом северном, Белоярском административном районе, граничащем с территорией ЯНАО, среднее значение отношения достигает 4.3, что указывает на усиление поступления морских воздушных масс.

Соотношение $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ изменяется от 1.1 до 2.6. Минимальные величины отмечены в Сургутском административном районе, что, вероятно, является следствием техногенного поступления нитрат-иона. Сходные значения были отмечены на территории Республики Коми, где соотношение молярных значений концентраций ионов $\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$ изменялось от 0.72 (южная тайга) до 2.28 (северная тайга) (Василевич и др., 2011).

Содержание НУВ в большинстве проанализированных проб (64 %) было ниже предела обнаружения (см. табл. 1). В 13 % проб концентрация НУВ превышала 0,05 мг/л, т.е. ПДК

для водоёмов рыбохозяйственного значения. В 2019–2023 гг. случаи превышения ПДК НУВ в поверхностных водах на ЛУ в ХМАО – Югре были зафиксированы в 4.7 % проанализированных проб (Московченко, Бабушкин, 2025). Таким образом, доля проб снега с превышением ПДК выше, чем доля проб поверхностных вод. Ранее указывалось, что в период снеготаяния происходит рост содержания НУВ в речных водах, когда поступают воды с загрязнённых нефтью водосборных площадей (Уварова, 2000). Учитывая, что доля проб снеготалых вод с превышением ПДК НУВ относительно невелика и незначительно превышает долю нефтезагрязнённых поверхностных вод, можно сделать вывод, что в настоящее время таяние снега вызывает рост нефтяного загрязнения поверхностных вод округа на локальных участках и не приводит к масштабному загрязнению.

Изучение состава снега на нефтяных месторождениях сопредельной Томской области показало, что снеготалые воды имеют преимущественно слабокислую реакцию, повсеместно характеризуются повышенным содержанием нитратов, содержание НУВ повышено в единичных пробах (Большунова, 2015), что в целом соответствует данным, полученным в ходе ЛЭМ на территории ХМАО – Югры.

Из металлов, которые практически всегда находят в снеге месторождений ХМАО – Югры, содержание Pb, Ni, Cr, Fe более чем в 50 % проб было ниже ПО. Количественное содержание более чем в 50 % проб было определено для Zn и Mn. Среднее содержание Zn в снеготалых водах составило 20.0 мкг/л, что меньше средних значений, выявленных ранее в снеге на месторождениях углеводородов Западной Сибири и варьирующих от 26.7 мкг/л (Дорожукова, 2004) до 49 мкг/л (Грива, 2006). Распределение Zn не соответствует нормальному закону (рис. 4); наблюдается значительная разница между средним арифметическим и медианой (см. табл. 2). Как и в случае с pH, гистограмма двухвершинная, что также можно интерпретировать как результат влияния двух факторов – природного и техногенного. Источники Zn – транспорт, буровые работы и сжигание попутного газа. Отмечено, что в зонах влияния факелов сжигания попутного газа концентрация Zn в снеготалой воде в 4 раза превышает фоновые значения (Московченко, Бабушкин, 2012).

Среднее содержание Mn составило 11.9 мкг/л, медиана – 2.8 мкг/л. Значительное различие среднего арифметического и медианы вызвано

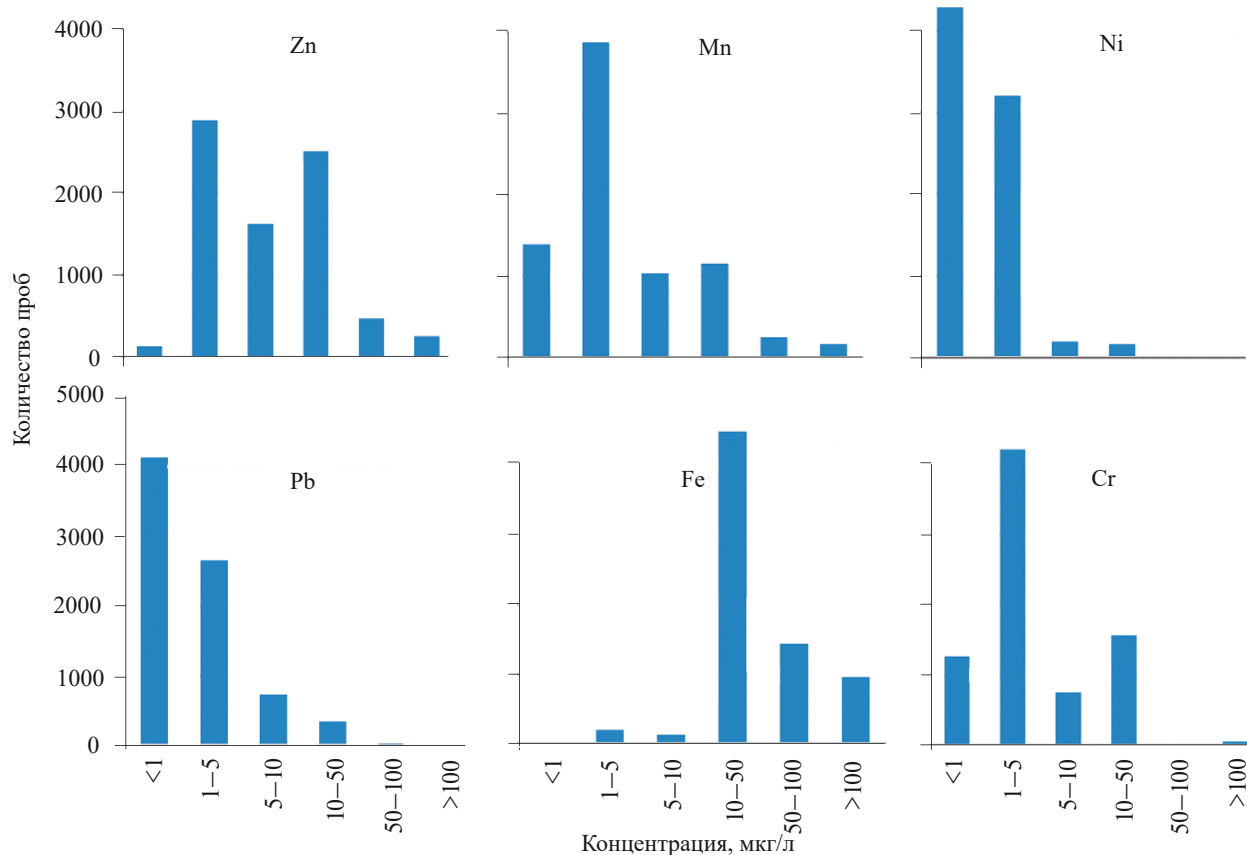


Рис. 4. Гистограммы распределения концентраций тяжёлых металлов в снеговой воде нефтяных месторождений ХМАО – Югры

Fig. 4. Histograms of the distribution of heavy metal concentrations in snowmelt water of oil fields in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra

частыми случаями аномально высокого содержания Mn, что, вероятно, вызвано попаданием в пробы почвенных частиц, источником которых служит автотранспорт. Значительная изменчивость содержания Mn в снеготалых водах на нефтяных месторождениях отмечалась и ранее. Так, разброс содержания Mn в снежном покрове таёжной зоны Западной Сибири составил 7–40.5 мкг/л (Дорожукова, 2004). Фоновые концентрации Mn в снеготалой воде на территории Западной Сибири составляют, по разным оценкам, от 3.6 (Shevchenko et al., 2017) до 5.4 мкг/л (Ермолов и др., 2014). Учитывая, что, по данным мониторинга, медианное значение составило 2.9 мкг/л, более чем в половине проанализированных проб содержание Mn было фоновым.

Содержание Ni в снеговой воде, как правило, не превышало 5 мкг/л. Чаще всего встречались пробы с содержанием Ni < 1 мкг/л (см. рис. 4). Более точные значения не определены, поскольку применяемые методы анализов имеют нижний

предел обнаружения 1 мкг/л. Фоновое содержание Ni в снеготалых водах центрального сектора Сибири оценено на уровне 0.7 мкг/л. Таким образом, используемые методики анализов при выполнении ЛЭМ недостаточны для точного определения геохимического фона. Однако результаты мониторинга позволяют выявить случаи значительного (в 10 и более раз) увеличения концентраций Ni вследствие техногенного загрязнения. Доля проб с концентрациями более 5 мкг/л составила 2.5%, более 10 мкг/л – 2.1%.

Содержание Pb, как и Ni, обычно не превышает 5 мкг/л, доля проб, где содержание Pb < ПО, составила 59.5%. В оценке содержания Pb в снеготалой воде нефтяных месторождений Западной Сибири существуют большие расхождения – от 1.6 мкг/л (Большунова, 2015) до 23 мкг/л (Грива, 2006). Вероятно, значительный рост содержания Pb происходит в случае выпадения нерастворимой фракции при запылении, поскольку доля растворимой фракции Pb

в снеговых водах обычно невелика и ненамного превышает фоновый уровень (Касимов и др., 2016; Moskovchenko et al., 2022).

Содержание Fe более чем в половине проанализированных проб варьировало от 10 до 50 мкг/л. В сходных исследованиях были зафиксированы более высокие концентрации Fe в снеговых водах месторождений углеводородов – от 50 мкг/л (Грива, 2006) до 327 мкг/л (Дорожукова, 2004). Содержание Cr, как правило, было ниже предела обнаружения. Наиболее типичен диапазон 1–5 мкг/л (см. рис. 4). Ранее отмечалось, что на нефтяных месторождениях Тюменской области концентрация хрома в снеговых водах составляет 0.2–7.8 мкг/л (Дорожукова, 2004), что близко к отмеченному нами диапазону варьирования.

Поступление ряда тяжёлых металлов (Pb, Zn, Ni) скоррелировано с поступлением сульфат-иона ($r=0.35$; 0.29 ; 0.33 соответственно, зависимость достоверна при $p < 0.01$).

Подсчёты КО показали, что для Mn характерно преобладание природных источников поступления (медиана КО=5.8), Ni и Cr имеют смешанное, природно-техногенное происхождение (медиана КО=25 и 54 соответственно), Pb и Zn поступают преимущественно из техногенных источников (КО=100 и 141 соответственно);

влияние техногенных источников на поступление Pb и Zn подтверждается при анализе пространственного распределения. Максимальные концентрации этих элементов отмечены на территории Сургутского и Нефтеюганского районов, для которых характерна самая высокая концентрация объектов промышленной инфраструктуры (см. рис. 3, в–г).

Оценка уровня загрязнения. Распределение концентраций ТМ по классам загрязнения в соответствии со значениями I_{geo} показывает, что чаще всего (в 50 % случаев) отмечаются загрязнения цинком (рис. 5). Затем, в порядке возрастания доли незагрязнённых проб, следуют Cr, Pb, Mn, Ni, Fe. Высокий и экстремальный уровень загрязнения наиболее часто отмечается для Cr и Ni. Ранее в снеге нефтяного месторождения отмечено преобладание Zn, Cr, Cu в составе твёрдофазной составляющей (Московченко и др., 2022), которые типичны для промышленной пыли и твёрдых отходов (Касимов и др., 2012), что свидетельствует о влиянии антропогенных источников формирования аэрозолей. Для хрома характерна значительная контрастность в распределении концентраций – от фоновых значений до экстремальных, превышающих уровень фона в десятки и сотни раз. Малорастворимый Cr поступает в снег в составе нерастворимых

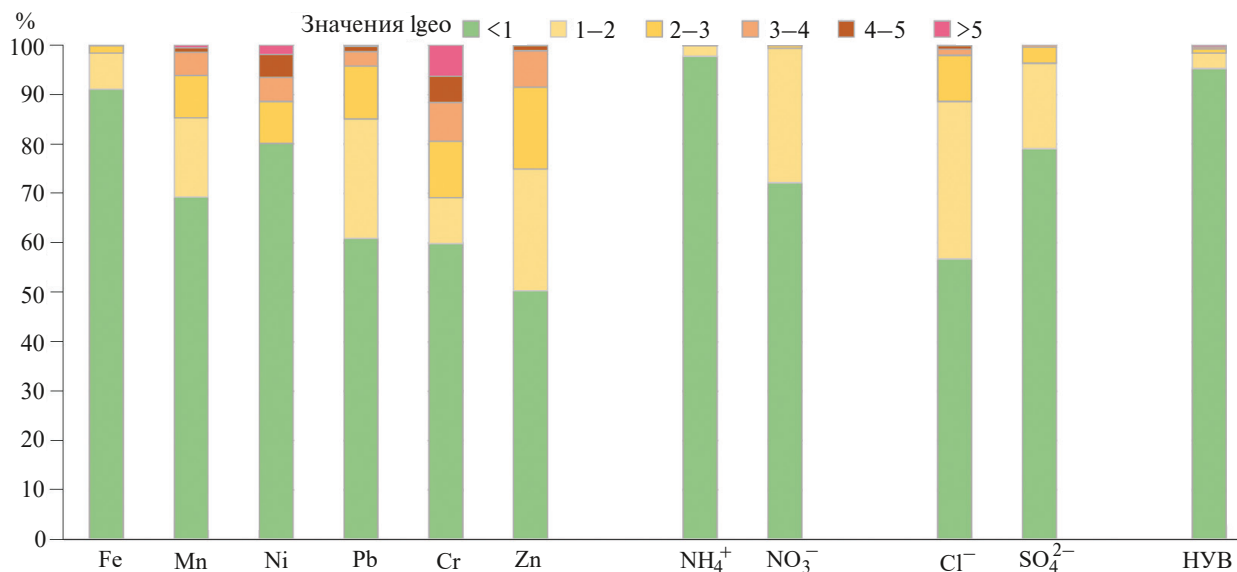


Рис. 5. Процентное распределение содержания загрязняющих вещества в снеговых водах на участках распределенного фонда недр ХМАО – Югры

Fig. 5. Percentage distribution of pollutant content in snow waters in areas of the distributed subsoil fund of Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug–Yugra

частиц, значительное увеличение концентрации происходит вследствие запыления.

Экологическая опасность соединений азота различается: содержание NH_4^+ в снеготалой воде практически повсеместно низкое, загрязнение отсутствует, в то время как по содержанию NO_3^- почти 30 % проб относится к умеренно загрязнённым.

Загрязнение хлоридами выражено сильнее, чем загрязнение сульфатами. Более 42 % проб по содержанию Cl^- относятся к загрязнённым. Вероятная причина роста содержания хлоридов – применение противогололёдных реагентов на автодорогах, а также поступление с выбросами факелов сжигания попутного газа, куда хлориды попадают из пластовых вод. Загрязнение нефтепродуктами проявляется редко: доля пунктов мониторинга с умеренным загрязнением снега углеводородами составляет 5 %, с повышенным – 1 %, с сильным – 0.5 % (см. рис. 5).

По величине суммарного индекса нагрузки PLI только 14 % проб относятся к категории “незагрязнённых” ($\text{PLI} < 1$). Преобладает умеренный уровень загрязнения ($1 < \text{PLI} < 2$) (рис. 6). Максимальный уровень загрязнения отмечен в Нефтеюганском административном районе (среднее значение $\text{PLI} = 3.7$). Затем, по мере уменьшения загрязнения, следуют Сургутский, Нижневартовский и Кондинский районы (значения $\text{PLI} = 2.7, 2.4$ и 2.2 соответственно). Значения PLI соответствуют уровню техногенной нагрузки, которая максимальна на территории Сургутского, Нефтеюганского и Нижневартовского административных районов, где сосредоточены основные нефтяные месторождения.

Определение источников загрязнителей. Статистически достоверные положительные корреляционные связи отмечены между содержанием нитрат-иона и такими показателями техногенеза, как число ДНС, скважин и кустовых площадок ($r = 0.73–0.78$, зависимость достоверна при $p < 0.05$) (табл. 3). Эти же объекты оказывают влияние на pH с той лишь разницей, что зависимость имеет отрицательный знак ($r = -0.70–0.73$). Таким образом, объекты подготовки и перекачки нефти, а также автотранспорт – источники закисления атмосферных осадков и роста содержания нитратного азота. Сжигание попутного нефтяного газа, которое производится на ДНС, выхлопы транспорта – причина образования окислов азота, которые при взаимодействии с атмосферной влагой преобразуются в азотную кислоту. Отмечалось, что нитраты, наравне

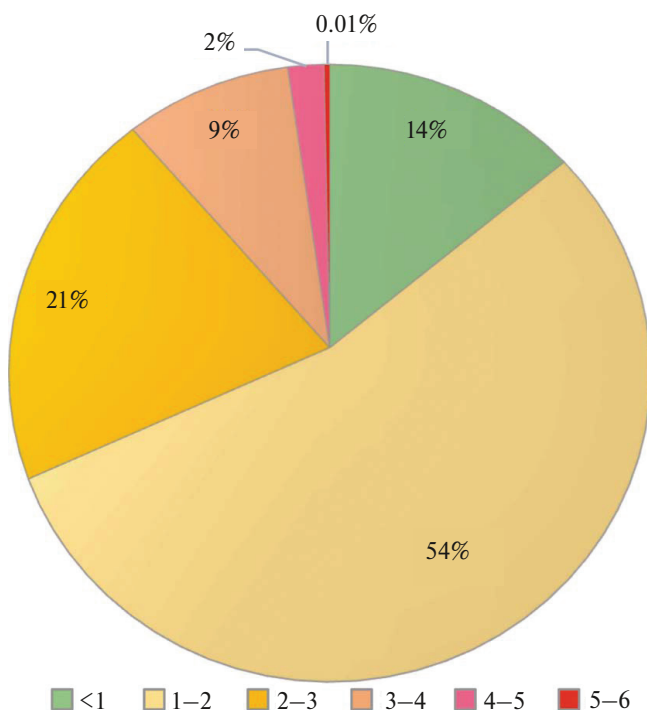


Рис. 6. Значение индекса нагрузки PLI по данным о составе снежного покрова лицензионных участков ХМАО – Югры 2015–2023 гг.

Fig. 6. PLI index values according to the data of snow cover composition at LU of Khanty-Mansi Autonomous Okrug–Yugra 2015–2023

с сульфатами, – причина закисления снега вблизи факелов сжигания попутного нефтяного газа (Рапута и др., 2000; Московченко и др., 2022). Также поступление нитратов в снег вызвано влиянием автотранспорта и внесением на автодороги твёрдых противогололёдных средств (Касимов и др., 2016).

Концентрация Ni связана положительной корреляционной зависимостью с протяжённостью автодорог ($r = 0.62$), что позволяет идентифицировать транспорт как основной источник выбросов этого элемента. Ni считается индикатором сжигания жидкого топлива (Nriagu, Расуна, 1998). Ранее отмечено, что для нефтяных месторождений ХМАО – Югры типичен уровень содержания Ni в снеговых водах 2–6 мкг/л (Московченко, 2013), что значительно превышает фоновые показатели. Повышенное содержание Ni в снеге также было отмечено на Ватинском месторождении в Среднем Приобье (Московченко и др., 2022) и на Заполярном газовом месторождении (Pozhitkov et al., 2020).

Таблица 3. Показатели состава снеготалых вод на ЛУ ХМАО – Югры в разные периоды наблюдений**Table 3.** Indicators of snowmelt water composition in licensed areas of the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Ugra during different observation periods

Показатель	2005–2010 гг.			2015–2023 гг.		
	М	Me	Q1–Q3	М	Me	Q1–Q3
pH	5.3	5.1	4.7–5.8	5.6	5.4	4.9–6.2
Хлориды, мг/л	2.5	1.2	0.6–2.8	1.4	1.0	0.5–1.4
Сульфаты, мг/л	1.4	0.9	0.5–1.4	1.3	0.8	0.4–1.5
Нитраты, мг/л	1.2	1.2	0.9–1.5	1.0	1.1	0.5–1.4
Аммоний, мг/л	0.27	0.15	0.08–0.33	0.23	0.17	0.08–0.26
Нефтепродукты, мг/л	0.09	0.04	0.025–0.07	0.034	0.02	0.01–0.032
Fe, мкг/л	97	50	39–100	69	25	25–59
Mn, мкг/л	9.1	5.0	3.0–10.0	11.9	2.8	1.5–7.4
Zn, мкг/л	20.3	12.0	7–25	20.0	7.5	2.5–20

Поступление сульфатов и цинка в снег зависит от количества отходов бурения ($r=0.75$ и 0.82 соответственно), т.е. определяется интенсивностью буровых работ. Положительная корреляция отмечена между содержанием Zn и количеством дожимных насосных станций, на которых проводится сжигание попутного газа ($r=0.55$). Запыление атмосферы при проведении буровых работ вызывает рост содержания сульфатов в снеге. Отмечалось, что в снеготалых водах под влиянием буровой установки возросло содержание цинка и взвешенных веществ (Дорожукова, 2004). Повышенное содержание Zn отмечено в районе размещения факелов сжигания попутного газа Ватинского нефтяного месторождения (Московченко и др., 2022) и на месторождениях Томской области (Климова, 2021).

Содержание НУВ положительно коррелирует с количеством аварий на трубопроводах и массой загрязнителей, поступивших в окружающую среду ($r=0.41$ и 0.46 соответственно), но зависимость слабая и статистически недостоверная. Отсутствие достоверной связи с показателями аварийности, вероятно, объясняется слабым испарением лёгких фракций разлитой нефти в зимний период и влиянием иных факторов, таких как выхлопы автотранспорта и сжигание попутного газа на факелах.

Тренды изменения состава снежного покрова. Сопоставление данных, полученных в ходе ЛЭМ в 2005–2010 и 2015–2023 гг., демонстрирует снижение концентрации хлоридов, сульфатов, нитратов, нефтепродуктов и железа (табл. 4). Выросла величина pH, медианное значение концентрации

Zn уменьшилось, при этом среднее арифметическое осталось на прежнем уровне. Наиболее сильно снизилось содержание нефтепродуктов, приблизительно на треть снизилось содержание железа. Наблюдается разнонаправленное изменение содержания Mn. Если среднее арифметическое значение выросло, то медиана уменьшилась, что связано с ростом числа проб с аномально высокими концентрациями Mn.

Для выявления причин снижения содержания загрязнителей рассмотрим статистику показателей техногенного воздействия в сравниваемые периоды. В последние годы в ХМАО – Югре наблюдается снижение объёмов добычи нефти, что связано с постепенным истощением старых месторождений, замедлением темпа ввода в эксплуатацию новых и выполнением соглашения со странами ОПЕК+ о сокращении добычи (Доклад..., 2024). Уменьшилось число ДНС и объёмы сжигаемого в факелах попутного газа (табл. 5), что объясняет снижение содержания нитратов и хлоридов, а также рост pH. Истощение старых месторождений требует ввода в строй новых эксплуатационных скважин, что ведёт к увеличению объёмов бурения. Вероятно, этим объясняется рост среднего содержания Mn, в значительной степени поступающего с атмосферной пылью. Содержание Zn осталось на прежнем уровне, поскольку рост пылевой составляющей компенсируется снижением поступления в растворённой форме из-за снижения объёмов сжигания попутного газа. Существенно снизилась аварийность на трубопроводах и сократились объёмы пролитой в результате аварий нефти, что определило снижение

Таблица 4. Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена, отражающие связь показателей химического состава снега и показателей техногенного воздействия

Table 4. Spearman’s rank correlation coefficients reflecting the relationship between snow chemical composition indicators and technogenic impact indicators

Показатель	pH	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	Cr	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	НУВ
Количество скважин	−0.73	0.53	0.15	0.73	0.42	0.40	0.23	0.18	0.48	0.50	0.57	0.17
Количество кустовых площадок	−0.70	0.43	0.07	0.77	0.45	0.47	0.22	0.25	0.47	0.60	0.53	0.18
Протяженность автодорог	−0.70	0.37	0.02	0.67	0.52	0.57	0.27	0.38	0.62	0.60	0.47	0.27
Количество ДНС	−0.72	0.55	0.12	0.78	0.35	0.37	0.18	0.17	0.47	0.48	0.55	0.20
Количество отходов бурения	−0.53	0.75	0.28	0.53	0.32	0.50	0.13	0.08	0.45	0.40	0.82	0.18
Количество объектов подготовки нефти	−0.72	0.43	0.12	0.60	0.42	0.42	0.25	0.20	0.53	0.40	0.47	0.13
Число аварий и инцидентов на трубопроводах	−0.59	0.67	0.20	0.59	0.47	0.40	0.24	0.33	0.53	0.59	0.57	0.41
Масса загрязнителей, попавших при авариях на почву	−0.49	0.75	0.20	0.59	0.32	0.27	0.09	0.26	0.41	0.49	0.52	0.46

Примечание. Жирным шрифтом выделены статистически значимые связи при $p < 0.05$.

Таблица 5. Показатели техногенного воздействия на ЛУ ХМАО – Югры, усреднённые значения за период наблюдений

Table 5. Indicators of anthropogenic impact on licensed areas in the Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra, average values for the observation period

Показатель	Годы наблюдений	
	2009–2010	2015–2023
Количество эксплуатационных скважин	100 443	112 023
Количество кустовых площадок	12 473	14 935
Эксплуатационное бурение, тыс. м	11 452	17 149
Количество объектов подготовки нефти	218	241
Количество ДНС	330	257
Сожжено в факелах попутного нефтяного газа, млн м ³	4820	1570
Протяженность автодорог, км	21 725	26 453
Количество аварий на трубопроводах, случаи	3391	24 88
Количество загрязняющих веществ, попавших при авариях в окружающую среду, т	9116	1401

концентрации НУВ с учётом зависимости этого показателя от аварийности.

ВЫВОДЫ

Объекты нефтедобывающей инфраструктуры на месторождениях ХМАО – Югры вызывают увеличение содержания в снеге нитратного

азота, хлоридов, тяжёлых металлов. Содержание хлоридов и сульфатов незначительно превышает фоновые показатели. Кислая реакция с $pH < 5.0$ отмечена в 35 % проб снега. Корреляционная зависимость pH от количества факелов сжигания попутного нефтяного газа и протяжённости транспортной инфраструктуры свидетельствует о техногенной природе закисления. Содержание

нитратного азота составляет в среднем 1.03 мг/л и превышает значения, отмеченные в сопредельных регионах, в то время как содержание аммонийного азота остаётся на фоновом уровне. Из тяжёлых металлов чаще всего наблюдается загрязнение Zn и Cr. Содержание Zn положительно коррелирует с объёмами отходов бурения и зависит от интенсивности буровых работ. Cr, Fe, Mn поступают с твёрдыми частицами при запылении атмосферы. Нефтяное загрязнение проявляется на локальных участках, повышенное содержание нефтяных углеводородов отмечено в 13 % проб. В 2015–2023 гг., по сравнению с 2005–2010 гг. наблюдалось снижение содержания в снеге ХМАО – Югры хлоридов, сульфатов, нитратов, нефтепродуктов и железа как следствие сокращения объёмов сожжённого в факелах попутного нефтяного газа, уменьшения объёмов буровых работ, снижения аварийности на трубопроводах.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственных заданий ТюмНЦ СО РАН № FWRZ-2021-0006.

Acknowledgments. This research was funded by projects No. FWRZ-2021-0006 of Tyumen Scientific Center SB RAS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Башкин В.Н. Биогеохимические циклы в тундровых экосистемах импактных зон газовой индустрии // Геохимия. 2017. № 1. С. 954–966.
- Большунова Т.С. Оценка степени трансформации природной среды в районах нефтегазодобывающего комплекса Томской области по данным изучения снегового покрова и лишайников-эпифитов: дис. канд. геол.-мин. наук. Томск, Томский политех. ун-т, 2015. 182 с.
- Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Химический состав снежного покрова на территории таежной зоны Республики Коми // Водные ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 494–506.
- Геохимия окружающей среды / Ю.Е. Саэт, Б.А. Ревич, Е.П. Янин. Москва: Недра, 1990. 335 р.
- Грива Г.И. Геоэкологические условия разработки газовых месторождений полуострова Ямал: дис. д-ра геол.-мин. наук. Надым: Фундаментпроект, 2006. 375 с.
- Доклад об экологической ситуации в Ханты-Мансийском автономном округе – Югре в 2023 году. Ханты-Мансийск 2024. 209 с. // Электронный ресурс. <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/doklad-ob-ekologicheskoy-situatsii-v-khanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge-yugre/10376694/2023-god/#media-10376694> Дата обращения: 05.04.2025.
- Дорожукова С.Л. Эколого-геохимические особенности нефтегазодобывающих районов Тюменской области: автореф. дис. канд. геол.-мин. наук. М.: Ин-т минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов; Промнефтегазэкология, 2004. 25 с.
- Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А. Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С. 790–800.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2012. № 4. С. 14–24.
- Касимов Н.С., Власов Д.В., Кошелева Н.Е., Никифорова Е.М. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы. М.: АПР. 2016. 276 с.
- Климова А.А. Комплексная эколого-геохимическая оценка бурового шлама нефтяных и нефтегазо-конденсатных месторождений Томской и Иркутской областей: дис. канд. геол.-мин. наук. Томск: НИИ Томск. политех. ун-т, 2021. 206 с.
- Кобелев В.О., Поповичева О.Б., Шинкарук Е.В., Агбальян Е.В., Колесников Р.А., Новигатский А.Н. Кислотность атмосферных осадков зимнего периода на территории районов Ямало-Ненецкого автономного округа с различной антропогенной нагрузкой // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2019. № 1 (102). С. 81–88.
- Моисеенко 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.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Тигеев А.А. Оценка содержания металлов и металлоидов в снежном покрове на участках нефтедобычи Среднего Приобья // Лёд и Снег. 2022. Т. 62. № 4. С. 551–563.
- 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., Бабушкин А.Г. Распределение индикаторных гидрохимических показателей в водных объектах Ханты-Мансийского автономного округа – Югры за период 2019–2023 годов // Водные и экологические проблемы Обь-Иртышского бассейна: новые вызовы, передовые решения: сб. материалов науч.-практич. конференции с международным участием, проходившей в рамках Международного водного форума. Ханты-Мансийск, 2025. С. 87–92.

- Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2022 г. Росгидромет, Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, 2023. 120 с.
- Оксиюк О.П., Жукин В.Н., Брагинский Л.П., Линник П.Н., Кузьменко М.И., Кленус В.Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29. № 4. С. 62–77.
- Постановление Правительства ХМАО – Югры от 23.12.2011 № 485-п “О системе наблюдения за состоянием окружающей среды в границах ЛУ на право пользования недрами с целью добычи нефти и газа на территории Ханты-Мансийского автономного округа – Югры и признании утратившими силу некоторых постановлений Правительства Ханты-Мансийского автономного округа – Югры” // Электронный ресурс. <https://docs.cntd.ru/document/453113931>. Дата обращения: 14.06.2025.
- Рапута В.Ф., Смоляков Б.С., Куценогий К.П. Оценка содержания сульфатов и нитратов в снегу окрестностей нефтегазового факела // Сибирский экологический журнал. 2000. № 1. С. 103–107.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 15. Алтай и Западная Сибирь. Вып. 3. Нижний Иртыш и Нижняя Обь. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 423 с.
- Савичев О.Г., Иванов А.О. Атмосферные выпадения в бассейне средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Известия РАН. Сер. География. 2010. № 1. С. 63–70.
- Смоляков Б.С., Куценогий К.П., Осипова Л.П., Рапута В.Ф., Павлюк Л.А., Филимонова С.М. Проблема кислотных выпадений на севере Западной Сибири: региональный и локальный аспекты // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13. № 6–7. С. 612–616.
- Соловьянов А.А. Об экологических проблемах сжигания попутного нефтяного газа на факелах. // Российский химический журнал. 2009. Т. LIII. № 5. С. 10–18.
- Таловская А.В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): дис. д-ра геол.-минер. наук. Томск: НИИ Томск. политех. ун-т, 2022. 373 с.
- Уварова В.И. Современное состояние качества воды р. Оби в пределах Тюменской области // Вестник экологии, лесоведения и ландшафтоведения. 2000. № 1. С. 18–26.
- Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. 3. № 2. С. 40–65.
- Angulo E. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal, ‘Mussel-Watch’ data: a useful index to assess coastal pollution // Science of the Total Environment. 1996. V. 187. № 1. P. 19–56.
- Caritat P., Hall G., Gislason S., Belsey W., Braun M., Golubeva N.I., Olsen H.K., Scheie J.O., Vaive J.E. Chemical composition of arctic snow: Concentration levels and regional distribution of major elements // Science of the Total Environment. 2005. V. 336. № (1–3). P. 183–199.
- 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 // Atmosphere. Chemistry. Physics. Discussion. 2015. V. 15. P. 8987–9002.
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Y., Minkina T.M., Sushkova S.N. Trace Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover of the City of Nizhnevartovsk (Western Siberia, Russia) // Arch Environment Contam. Toxicol. 2023. V. 84. P. 101–118.
- Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River // GeoJournal. 1969. V. 2. P. 108–118.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8179-4>
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental Crust. Treatise on Geochemistry. The Crust; Elsevier Science: New York, NY, USA, 2003. V. 3. P. 1–64. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- Salih Zh.R., Othman B.A., Aweez S.J. Assessment of heavy metals in rainfall as an indicator of air pollution from Erbil Steel Factory in Iraq // Environment Monitoring Assess. 2024. V. 196. P. 319 <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12501-9>
- Salo H., Berisha A.-K., Mäkinen J. Seasonal comparison of moss bag technique against vertical snow samples for monitoring atmospheric pollution. // Journal of Environmental Sciences. 2016. V. 41. P. 128–137.
- 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.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017>
- Ushakova E., Menshikova E., Volkova M., Karavaeva T., Vaganov S. Assessment of trace elements pollution in snow piles removed from residential areas in Perm, Russia. // Journal of Water and Land Development. 2023. V. 56. № I–III. P. 109–117.
<https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143751> 2023
- Vasilevich M.I., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Organic matter in snow cover in the influence zone of emissions from a pulp-and-paper mill. // Water resources. 2009. V. 36. № 2. P. 2170–176.

Citation: Moskovchenko D.V., Babushkin A.G., Toptygina M.N. Results of long-term monitoring of snow pollution at oil fields in Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (4): 597–613. [In Russian]. doi: 10.7868/S2412376525040061.

Results of long-term monitoring of snow pollution at oil fields in Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra

© 2025 D. V. Moskovchenko^{a, #}, A. G. Babushkin^a, M. N. Toptygina^b

^aTyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

^bTyumen State university, Tyumen, Russia

[#]e-mail: moskovchenko1965@gmail.com

Received April 29, 2025; revised June 17, 2025; accepted September 25, 2025

A study of the chemical composition of snow at the oil fields of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra (KhMFO – Yugra) was carried out from 2015 to 2023. The snow pH and total contents of heavy metals (Cr, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn), ammonium and nitrate nitrogen, petroleum hydrocarbons, chlorides, and sulfates were analyzed using data of the environmental monitoring. The content of ammonium nitrogen in the snow corresponded to the background concentration, while the same of nitrate nitrogen exceeded the background magnitudes. A certain acidification of precipitation was revealed. In some sites, pollution of the snowmelt waters with petroleum hydrocarbons was found. Zn and Cr are the most commonly found heavy metals. To identify sources of pollution, a correlation analysis was conducted, establishing a relationship between snow composition and specific indices of technogenesis. The pH value of snowmelt water is in negative correlation with a number of flares used for burning associated petroleum gas. A weak positive correlation was identified between the content of petroleum hydrocarbons and pipeline accident rates. The content of Zn depends on the amount of drilling waste and is determined by the intensity of drilling operations. It was concluded that the composition of snow has a pronounced effect upon the ecological state of surface waters since melting of snow increases the content of nitrate nitrogen as well as the concentration of petroleum hydrocarbons. To determine the trends of atmospheric pollution, the monitoring results of 2015–2023 were compared with the data of 2005–2010. A decline in the concentrations of chlorides, sulfates, nitrates, petroleum products, and iron in the snow was found, which can be attributed to reduction of the volume of associated petroleum gas burned in flares and a lowering of the pipeline accidents.

Keywords: snow cover, oil field, West Siberia, environmental pollution, trace metals

REFERENCES

- Bashkin V.N. Biogeochemical cycles in tundra ecosystems in areas impacted by gas industry facilities. *Geochemistry International*. 2017, 10 (55): 946–956. [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. Ph D. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2015: 21 p. [In Russian].
- Vasilevich M.I., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Chemical composition of snow cover in the taiga zone of the Komi Republic. *Vodnye Resursy*. Water Resources. 2011, 38 (4): 494–506. [In Russian].

- Griva G.I. Geoeological conditions for the development of gas fields on the Yamal Peninsula. Grand Ph D. Nadym, FSUE "Fundamentproekt", 2006: 375 p. [In Russian].
- Doklad ob ekologicheskoy situatsii v Khanty-Mansiyskom avtonomnom okruge – Yugre v 2023 godu. Report on the environmental situation in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra in 2023. Khanty-Mansiysk, 2024: 209 p. Retrieved from: <https://prirodnadzor.admhmao.ru/doklady-i-otchyety/doklad-ob-ekologicheskoy-situatsii-v-khanty-mansiyskom-avtonomnom-okruge-yugre/10376694/2023-god/#media-10376694>. Last access: April, 5 2025. [In Russian].
- Dorozhukova S.L. Ecological and geochemical features of oil and gas producing areas of Tyumen region. PhD-tesis. Moscow: Institute of Mineralogy, Geochemistry and Crystal Chemistry of Rare Elements; State Enterprise Promneftegazekologiya, 2004: 25 p. [In Russian].
- Ermolov Yu.V., Makhatkov I.D., Khudyaev S.A. Background concentration of chemical elements in snow cover of the typical regions of the Western Siberia. *Optika Atmosfery i Okeana*. Optics of the Atmosphere and Ocean. 2014, 27 (9): 790–800. [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].
- Kasimov N.S., Vlasov D.V., Kosheleva N.E., Nikiforova E.M. *Geohimiya landshaftov Vostochnoy Moskvy*. Geochemistry of Landscapes of Eastern Moscow. APR Publishing, 2016: 276 p. [In Russian].
- Klimova A.A. *Kompleksnaya jekologo-geohimicheskaja ocenka burovogo shlama nefjanyh i neftegazokondensatnyh mestorozhdenij Tomskoj i Irkutskoj oblastej*. Comprehensive ecological and geochemical assessment of drilling mud from oil and oil and gas condensate fields in the Tomsk and Irkutsk regions. Ph D. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2021: 206 p. [In Russian].
- Kobelev V.O., Popovicheva O.B., Shinkaruk E.V., Agbalyan E.V., Kolesnikov R.A., Novigatskiy A.N. Acidity of precipitation in winter in the regions of the Yamal-Nenets autonomous district with different anthropogenic load. *Nauchnyj vestnik Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga*. Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2019, 102 (1): 81–88. [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. <https://doi.org/10.7868/S0016752516120104> [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Y., 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. <https://doi.org/10.31857/S2076673422040151> [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, 16 (1): 71–81. [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Distribution of hydrochemical indicators in water bodies of Khanty-Mansiysk autonomous okrug – Yugra for the period 2019–2023. *Vodnye i ekologicheskie problemy Ob'-Irtyskogo bassejna: novye vyzovy, peredovye resheniya*. Water and environmental problems of the Ob-Irtys basin: New challenges, advanced solutions. Materials of the scientific and practical conference with international participation, held within the framework of the International Water Forum. Khanty-Mansiysk, 2025: 87–92. [In Russian].
- Obzor fonovogo sostoyaniya okruzhayushchey prirodnoy sredy na territorii stran SNG za 2022. Review of the background state of the natural environment in the CIS countries for 2022. Roshydromet, Federal State Budgetary Institution Institute of Global Climate and Ecology named after Academician Yu.A. Izrael, 2023: 120 p. [In Russian].
- Oksijuk O.M., Zhukinskij V.N., Braginskij L.P., Linnik P.N., Kuz'menko M.I., Klenus V.G. Complex ecological classification of the quality of land surface waters. *Gidrobiologicheskij zhurnal*. Hydrobiological Journ. 1993, 29 (4): 62–77. [In Russian].
- Postanovleniye Pravitel'stva KHMAO – Yugry ot 23.12.2011 № 485-p. Resolution of the Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug of 23 December 2011 No 485-p "On the system of observation of the environment within the boundaries of the license areas for the right to use natural resources for oil and gas in the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug-Yugra and Repeal of certain decision of the Government of the Khanty-Mansiysk Autonomous Okrug – Yugra. Retrieved from: <https://docs.cntd.ru/document/453113931> (Last access: June, 14 2025). [In Russian].
- Raputa V.F., Smolyakov B.S., Kutsenogii K.P. Assessment of the content of nitrates and sulfates in snow in the vicinity of an oil and gas flare. *Sibitskiy Ekologicheskij Zhurnal*. Siberian Ecological Journ. 2000, 7 (1): 103–107. [In Russian].
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR. Surface Water Resources of the USSR, V. 15: Altai and Western Siberia. Is 3: The Lower Irtysh and the Lower Ob. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973: 423 p. [In Russian].
- Savichev O.G., Ivanov A.O. Atmospheric fallout in the middle Ob basin and its impact on the hydrochemical runoff of rivers. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*.

- Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series, 2010, 1: 63–70. [In Russian].
- Smolyakov B.S., Kutsenogiy K.P., Osipova L.P., Raputa V.F., Pavlyuk L.A., Filimonova S.M. Acid deposition at north of Western Siberia: Regional and local aspects. *Optika atmosfery i okeana*. Atmospheric and oceanic optics. 2000, 13 (6–7): 612–616. [In Russian].
- Solovianov A.A. On ecological problems of flaring associated petroleum gas. *Rossiiskij Himicheskij Zhurnal. Russian Journal of General Chemistry*. 2009, 53 (5): 10–18. [In Russian].
- Talovskaya A.V. *Ekogeokhimiya atmosferykh aerorozley na urbanizirovannykh territoriyakh yuga Sibiri (po danym 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). Grand Ph D. Tomsk: TGU, 2022: 373 p. [In Russian].
- Uvarova V.I. Current state of water quality of the Ob River within the Tyumen region. *Vestnik ekologi, lesovedeniya i landshaftovedeniya*. Bulletin of ecology, forestry and landscape science. 2000, 1: 18–26. [In Russian].
- Fotiev S.M. Regularities of formation of ion-salt composition of natural waters of Yamal. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 1999, 3 (2): 40–65. [In Russian].
- Geokhimiya okruzhayushchey sredy*. Environmental Geochemistry. Moscow: Nedra, 1990: 335 p. [In Russian].
- Angulo E. The Tomlinson Pollution Load Index applied to heavy metal, 'Mussel-Watch' data: A useful index to assess coastal pollution. *Science of The Total Environment*. 1996, 187 (1): 19–56.
- Caritat P., Hall G., Gislason S., Belsey W., Braun M., Goloubeva N.I., Olsen H.K., Scheie J.O., Vaive J.E. Chemical composition of arctic snow: Concentration levels and regional distribution of major elements. *Science of the Total Environment*. 2005, 336 (1–3): 183–199.
- 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. Discuss*. 2015, 15: 8987–9002.
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Y., Minkina T.M., Sushkova S.N. Trace Metals and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Snow Cover of the City of Nizhnevartovsk (Western Siberia, Russia). *Arch. Environ. Contam. Toxicol*. 2023, 84: 101–118.
- Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. *GeoJournal*. 1969, 2: 108–118.
- Nriagu J.O., Pacyna J.M. Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature*. 1988, 333: 134–139.
- Pojitkov 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 north-western Siberia: the impact of urban and industrial emissions. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2020, 192 (4): 215–221.
<https://doi.org/10.1007/s10661-020-8179-4>
- Rudnick R.L., Gao S. Composition of the continental Crust. *Treatise on Geochemistry. The Crust*; Elsevier Science: New York, NY, USA. 2003, 3: 1–64.
<https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>
- Salih Zh.R., Othman B.A., Aweez S.J. Assessment of heavy metals in rainfall as an indicator of air pollution from Erbil Steel Factory in Iraq. *Environ Monit Assess*. 2024, 196: 319
<https://doi.org/10.1007/s10661-024-12501-9>
- Salo H., Berisha A.-K., Mäkinen J. Seasonal comparison of moss bag technique against vertical snow samples for monitoring atmospheric pollution. *Journ. of Environmental Sciences*. 2016, 41: 128–137.
- 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.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017>
- Ushakova E., Menshikova E., Volkova M., Karavaeva T., Vaganov S. Assessment of trace elements pollution in snow piles removed from residential areas in Perm, Russia. *Journ. of water and land development*. 2023, 56 (1–3): 109–117
<https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143751>
- Vasilevich M.I., Gabov D.N., Beznosikov V.A., Kondratenok B.M. Organic matter in snow cover in the influence zone of emissions from a pulp-and-paper mill. *Water resources*. 2009, 36 (2): 170–176.