

Эколого-геохимическая оценка снежного покрова Якутска

© 2021 г. В.Н. Макаров*, Н.В. Торговкин

Институт мерзлотоведения Сибирского отделения РАН, Якутск, Россия

*vnmakarov@mpi.ysn.ru

Ecological and geochemical characteristics of the snow cover in the Yakutsk city (Central Siberia)

V.N. Makarov*, N.V. Torgovkin

Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia

*vnmakarov@mpi.ysn.ru

Received December 24, 2020 / Revised April 26, 2021 / Accepted June 25, 2021

Keywords: *snow cover, geochemistry, ecology, aerosol pollution, Yakutsk.***Summary**

For the first time, the geochemistry of snow cover on the territory of the city of Yakutsk, the largest city located in the permafrost zone, is considered on the basis of recent methods of analysis. To study the chemical composition of the snow cover and estimate the ecological state of the city in March 2020, 80 snow samples were collected on its territory and analyzed for a wide range of chemical elements. It was found that the background chemical composition of the soluble phase of the snow cover in the Yakutsk region is typical for the middle taiga landscapes of Yakutia: chloride-hydrocarbonate, predominantly calcium, with an acidic reaction and very low mineralization. On the basis of the present-day technique of analysis, the features of the transformation of the chemical composition of the soluble phase of snow cover in the urbanized area were evaluated. In the zone of technogenic action, the mineralization of snow water increases following the increase in the concentration of sulfates, calcium and ammonium; the reaction becomes alkaline. The technogenic load on the snow cover in Yakutsk and the main factors of its formation had been determined. The contribution of pollutants in the gas-aerosol phase is approximately 0.2% of the volume of winter dust fallout. In winter, the main source of pollution of the atmosphere here is the motor transport, and to a smaller degree - energy facilities and industrial enterprises. The features of the macro- and microelement composition of the soluble phase of snow were established as well. Macropollutants and nitrogen compounds account for 90–95% of the total atmospheric precipitation, the major quantity of which is carbon. The most contrasting technogenic transformation of microelements is characteristic of Cu, Fe, Cd, Sn, Zn, and Al. The value and parameters of the winter atmospheric load on the snow cover had been determined. The characteristics of the ionic composition of the soluble phase of snow in Yakutsk and the parameters of their changes had been revealed. Almost throughout the whole city, the level of contamination with toxic elements is estimated as low and moderately dangerous. Heavy metal pollution of the snow cover here is noticeably lower than this takes place in the cities of Eastern Siberia (Blagoveshchensk, Bratsk, Irkutsk, Chita).

Citation: Makarov V.N., Torgovkin N.V. Ecological and geochemical characteristics of the snow cover in the Yakutsk city (Central Siberia). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2021. 61 (3): 420–430. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673421030098.

Поступила 24 декабря 2020 г. / После доработки 26 апреля 2021 г. / Принята к печати 25 июня 2021 г.

Ключевые слова: *снежный покров, геохимия, экология, аэрозольное загрязнение, Якутск.*

Анализируются результаты геохимического изучения снежного покрова на территории города Якутска. Установлено, что в зимней атмосфере города формируются полиэлементные техногенные аэрогеохимические аномалии тяжёлых металлов, редких, рассеянных и радиоактивных элементов. Наиболее контрастная техногенная трансформация (превышение над фоном) наблюдается для Cu, Fe, Cd, Sn, Zn и Al. Величина газово-аэрозольной нагрузки химических элементов изменяется в пределах семи порядков: от 10 нг/(м²·сут.) для макрокомпонентов Ca и C до минимальных значений для редких и рассеянных элементов (Be, Ag, Tl, Th, Pt, Au) – 0,00000 нг/(м²·сут.). Практически на всей территории города уровень загрязнения снежного покрова токсичными элементами оценивается как низкий и умеренно опасный.

Введение

Снежный покров — депонирующая среда для атмосферных загрязнителей. Он характеризуется рядом свойств, которые позволяют использовать его в качестве удобного индикатора загрязнения

атмосферного воздуха. С помощью результатов исследования состава растворимой фазы снега можно также получать информацию об основных тенденциях распределения загрязняющих веществ в атмосфере. Исследованиями ИМГРЭ [1] экспериментально доказана возможность использо-

вать снежный покров как индикатор загрязнения атмосферного воздуха в урбанизированных условиях. Работы по изучению химического состава снежного покрова проведены в регионах и городах Восточной Сибири: в Благовещенске [2], Иркутской области [3], Чите [4]. Авторы настоящей статьи изучают химический состав снежного покрова на территории Якутии с 1984 г.

Цель исследования — выяснение эколого-геохимической обстановки на территории г. Якутск на основе изучения макро- и микро-элементного состава растворимой фазы снега с применением современных методов анализа. Основу работы составляют результаты наблюдений авторов на территории Якутска в марте 2020 г. и данные многолетнего мониторинга химического состава атмосферных осадков на стационаре «Туймаада» Института мерзлотоведения СО РАН (ИМЗ СО РАН).

Методика исследований

Для получения информации о количестве, происхождении и химическом составе снежного покрова авторами 18–22 марта 2020 г. на территории города было отобрано 80 проб снега (рис. 1). Фоновый участок наблюдений находился в районе оз. Чабыда в 25 км к юго-западу от города за пределами зоны техногенного воздействия (см. рис. 1). Отбор проб проводили в оптимальный период для изучения снега, непосредственно перед началом снеготаяния. Пробы снега на точке наблюдений отбирали на площадке 30×30 см (без снятия 1,5 см снега у почвы). Минимальная удалённость от проезжей части составляла не менее 30 м, в большинстве случаев — более 200 м. В каждом пункте выполняли 5–6 измерений толщины снежного покрова при помощи складной вешки с сантиметровой разметкой. Для отбора пробы использовали маркированный по 0,5 см стеклянный цилиндр со стальным окаймлением диаметром 82 мм, который опускали с поверхности снежного покрова на плоскую прямоугольную стальную лопатку на высоте 1,5 см от почвы либо у поверхности льда. Далее пробу помещали в пластиковый пакет и помещали на электронные весы для расчёта массы снега и определения его плотности. Дополнительно замеряли температуру воздуха и снега (на поверхности и на почве)

при помощи переносной термопары. Пробы ежедневно поступали в лабораторию ИМЗ СО РАН, где непосредственно перед анализом при комнатной температуре их плавили. После полного таяния пробу разделяли на твёрдую и жидкую фазы путём фильтрования через бумажные фильтры «синяя лента» с диаметром пор 1 мкм.

Аналитическую обработку геохимических проб проводили в лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны ИМЗ СО РАН (аналитики Л.Ю. Бойцова, Е.С. Петрова, О.В. Шепелева) и в Аналитическом сертификационном испытательном центре Института проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов РАН (ИПТМ РАН), г. Черноголовка, Московская обл. Все пробы снега анализировали по аттестованным методикам с использованием стандартных образцов сравнения в аккредитованных лабораториях; проведены также процедуры внутреннего и внешнего аналитического контроля. Камеральные работы предусматривали статистическую и графическую обработку результатов лабораторных работ, а также анализ полученных материалов. Для оценки степени загрязнённости снежного покрова использовали следующие эколого-геохимические коэффициенты: P_n мг/(м²·сут.) — величина общей нагрузки, создаваемой поступлением каждого химического элемента на снежный покров, которая учитывает нагрузку и концентрацию химического элемента C (мг/л) в растворимой фазе снега; KK — коэффициент концентрации — показатель уровня аномальности содержаний химических элементов; Z_c — суммарный показатель загрязнения снежного покрова, характеризующий эффект воздействия группы элементов. Их описание, расчётные формулы и порядок расчётов приведены в работе [1]. Построение карт проводилось по программе SASPlanet на основе базы картографических материалов; за основу были взяты карты Яндекс.ру. В Surfer методами триангуляции и кригинга строились карты-схемы [5, 6].

Описание района

Город Якутск расположен в среднем течении р. Лена, в широкой долине Туймаада, и протягивается вдоль левого берега реки на 20 км. Якутск — крупнейший и старейший город в мире, расположенный в сплошной криоли-

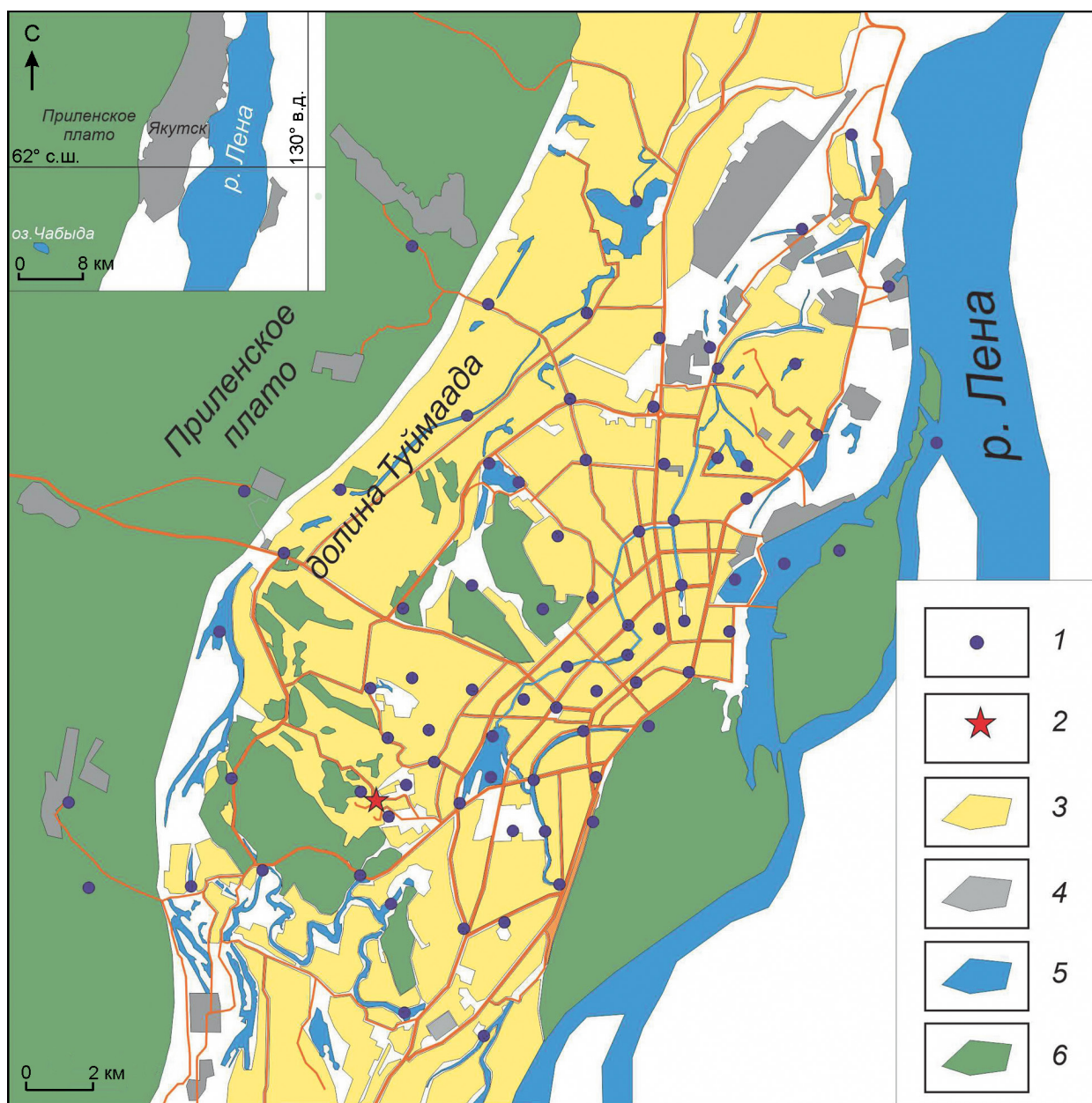


Рис. 1. Карта фактического материала:

1 – пункты отбора проб; 2 – стационар «Туймаада»; 3 – селитебная зона; 4 – промышленная зона; 5 – река, озёра; 6 – леса, луга

Fig. 1. Map of the actual material:

1 – sampling points; 2 – Tuymaada station; 3 – residential area; 4 – industrial zone; 5 – river, lakes; 6 – forests, meadows

тозоне. По величине это третий город в Дальневосточном федеральном округе после Владивостока и Хабаровска. Отметим, что за последние 20 лет численность населения выросла со 195 тыс. в 2000 г. до 323 тыс. в 2020 г. Планировочная структура города – радиально-кольцевая. Частая сетка улиц образует значительное число небольших по площади кварталов (от 2 до 8 га). Проезжая часть улиц в основном

приподнята. Характер застройки неровный: на окраинах города – преимущественно одно- и двухэтажные строения, в центральной части города – капитальная застройка каменными зданиями (от 4–5 до 9–16 этажей).

По классификации климатов А.А. Григорьева и М.И. Будыко [7], Якутск находится в зоне действия климата недостаточно влажного (индекс сухости от 1 до 2), умеренно тёплого (в тёплый

период), с суровой малоснежной зимой. Основное влияние на климат района зимой оказывает отрог азиатского антициклона, связанный с вторжением из Арктики холодных воздушных масс. Формирование высокого давления начинается уже с сентября и сопровождается резким похолоданием. В этих условиях зима характеризуется преобладанием штилей, малой облачностью и сильными устойчивыми морозами. Летом усиливается циклоническая деятельность. Циклоны приходят с запада, северо-запада или юго-запада. Континентальность климата обусловлена удалённостью района Якутска от Атлантического океана и защищённостью горными массивами от Тихого океана. Наиболее открыт этот район для арктического воздуха, поэтому в основные сезоны в Якутске преобладают континентальный воздух умеренных широт и арктический воздух. Это и обуславливает экстроконтинентальный климат Якутска, не имеющий аналогов на всей равнинной части Северного полушария [8].

Ветровой режим в значительной степени связан с местоположением города. Так как долина реки в районе города направлена с юга на север, преобладают ветры северной четверти горизонта, в основном северного и северо-западного направления. Отличительная черта ветрового режима Якутска — большая повторяемость штилей. Чаще всего безветренная погода наблюдается в декабре—феврале. Средняя скорость ветра в этот период — 0,8 м/с. Средняя годовая скорость ветра в городе — 2,4 м/с. *Среднегодовая температура воздуха* за период непрерывных метеонаблюдений (1883—2019 гг.) варьирует от $-7,2$ до $-12,1$ °С, среднегодовое количество осадков — 235 мм. По данным Ю.Б. Скачкова [8], тенденция повышения среднегодовой температуры воздуха значительна, отмечается стабильный рост, что вызвано, главным образом, повышением температуры зимой (с октября по апрель). *Сумма осадков* по месяцам и по годам близка к норме. Характеристики снежного покрова в Якутске в последние 50 лет оставались на уровне многолетних средних показателей, однако межгодовая изменчивость отдельных характеристик снежного покрова усилилась. В 2003 и 2010 гг. в Якутске отмечались абсолютные минимумы максимальной среднедекадной толщины снежного покрова, равные 20 см, а 2005 г. — абсолютный максимум, составивший 50 см. В зимний

период 2019—2020 гг. наблюдалось 196 дней с устойчивым снежным покровом.

На территории города насчитывается около 160 крупных предприятий, имеющих стационарные источники выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, количество которых достигает 11 700 т [9]. К стационарным источникам выбросов относятся объекты теплоэнергетики: крупные электростанции (газотурбинные ЯГРЭС, ЯГРЭС-1 и тепловая ЯТЭЦ) и многочисленные котельные. В Якутске и его пригородах работают 145 промышленных котельных, более 400 маломощных автономных котельных, использующих газовое топливо, а также небольшие дизельные и угольные котельные. По данным ГИБДД Якутска, в 2018 г. в столице и пригородах зарегистрировано порядка 119 тыс. единиц автотранспорта, выбрасывающих в атмосферу около 34 тыс. т загрязнителей. В зимнее время количество автотранспорта снижается примерно на 1/3 в основном за счёт легковых автомобилей.

Уровень загрязнения атмосферного воздуха Якутска оценивается как повышенный. Загрязнение атмосферного воздуха на территории города неравномерно. Больше всего загрязнён воздух в центральной части города, где повторяемость концентраций взвешенных веществ ВВ, превышающих ПДК, достигает 43% [9]. В 2014—2018 гг. прослеживалась тенденция снижения среднегодовых концентраций диоксида азота, оксида азота, сероводорода, фенолов и аммиака. Наблюдался рост среднегодовых концентраций взвешенных веществ, формальдегида, бенз(а)пирена и небольшое повышение оксида углерода. Концентрация газов NO_2 и CO , приоритетных по объёмам выбросов в атмосферу города, и в летнее, и в зимнее время примерно одинаковая (ПДК зима/лето): NO_2 — 0,480/0,482; CO — 0,369/0,331. Зимой основной объём выбросов связан с автотранспортом и отоплением города, летом — с автотранспортом и поступлением с поверхности земли.

Результаты и обсуждение

Основные пути попадания загрязняющих веществ в зимнюю атмосферу города — техногенные выбросы, выпадение атмосферных осадков и, в небольшой степени, поступление пылевых частиц с поверхности земли. Уровень накопле-

Таблица 1. Средняя концентрация химических компонентов (мг/л) в снежном покрове фонового участка г. Якутск (март 2020 г.)

Компоненты	Оз. Чабыда	Компоненты	Оз. Чабыда
pH	5,13	NO ₂ ⁻	0,050
Eh, мВ	544	NO ₃ ⁻	0,657
Ca ²⁺	0,710	F ⁺	0,018
Mg ²⁺	0,312	Li ⁺	0,005
Na ⁺	0,600	Sr ²⁺	0,280
K ⁺	0,350	Ba ²⁺	0,005
NH ₄ ⁺	0,200	HPO ₄ ²⁻ (P)	0,036
HCO ₃ ⁻	4,330	Минерализация	6,447
Cl ⁻	1,054	Взвешенные вещества*	0,007
SO ₄ ²⁻	0,387		
Химический состав (формула Курлова)		C 57 Cl 32 S 7 NO ₃ 4 Ca 32 Na 25 Mg 22 NH ₄ 12 K 9	

*Содержание дано в г/л.

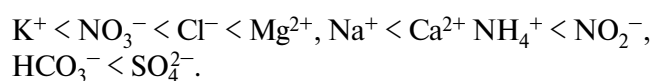
ния химических элементов в снежном покрове связан с их концентрацией в выпадениях и с объёмом выпадений в течение зимнего времени. Наблюдения за химическим составом снежного покрова проводятся в процессе многолетнего мониторинга на территории города и на стационаре «Туймаада» ИМЗ СО РАН. Результаты мониторинговых наблюдений позволили дать качественную и количественную оценку выпадений атмосферных осадков: изменение содержания химических компонентов и плотности, а также объёма выпадений.

Химический тип снеговых вод в районе оз. Чабыда — хлоридно-гидрокарбонатный, смешанный по составу катионов с преобладанием кальция, с очень низкой минерализацией — около 6 мг/л (табл. 1) и кислой реакцией (pH = 5,13). Он характерен для среднетаёжных ландшафтов Якутии [10]. Техногенное воздействие городского хозяйства вызывает повышение концентрации в снежном покрове большинства химических компонентов: Ca, Mg и Na, аммония, сульфатов, карбонатов, хлоридов. Химический состав городских снеговых вод остаётся хлоридно-гидрокарбонатным с резко возрастающей ролью кальция и относительно повышенной по сравнению с фоном щёлочностью. Распределение химических компонентов в снежном покрове Якутска приведено в табл. 2.

Установлены общие закономерности техногенного воздействия: реакция снеговых вод города переходит в нейтральный интервал

(pH = 7,30), величина минерализации и градиент концентраций большинства компонентов в центральной части города повышаются. Экологическое неблагополучие в центральной части города обусловлено климатическими, геоморфологическими и техногенными факторами. Якутск находится в нижней части речной долины и оказывается в зоне зимней инверсии, где фиксируется до 56 туманных дней в году. Результат слабого проветривания — высокое загрязнение воздуха. В последние годы застройка поймы ещё сильнее ухудшила условия проветривания данной территории. Кроме того, северное и северо-западное направление преобладающих ветров способствует переносу загрязнителей из северной промышленной зоны города в жилую.

По степени повышения величины газовой аэрозольной нагрузки макрокомпоненты и соединения азота растворимой фазы снега образуют ряд, кларк концентрации компонентов в котором возрастает до 1,3 для калия до 12–14 для сульфатов и кальция:



На долю макрополлютантов и соединений азота приходится 90–95% общего объёма газовой аэрозольных продуктов выпадений. Соотношение макрополлютантов по величине плотности выпадений в пересчёте на элемент C>N>S показывает преобладание углерода, на долю которого приходится около 72% общего объёма зимних выпадений. По средней концентрации и плотности атмосферных выпадений г. Якутск можно назвать «углеродным» городом.

Газово-аэрозольная нагрузка в холодное время года (поступление загрязнителей в растворимой фазе снежного покрова из атмосферы) неравномерно распределяется на территории города. Аномальное поле электропроводности снежного покрова (снеговой воды) выше 70–80 мСм/см практически локализуется в пределах города. К западу от городской территории формируется слабая локальная аномалия электропроводности, обусловленная энергетическим и транспортным воздействием: выбросами ГРЭС-2 и автотранспорта. Величина газовой и аэрозольной нагрузки в районе города по данным десятилетнего мониторинга снежного покрова на стационаре «Туймаада» имеет устойчи-

Таблица 2. Содержание макрокомпонентов (мг/л) соединений азота в снежном покрове и величина газовой-аэрозольной нагрузки P_n на территории г. Якутск (зима 2020 г.)*

Компоненты	$C_{\min.}$	$C_{\max.}$	$C_{\text{арифм.}}$	$C_{\text{геом.}}$	Стандартное отклонение $\pm\sigma$	P_n , мг/(м ² ·сут.)	
						средняя	максимальная
pH	6,77	7,70	7,30	7,29	0,2	—	
Eh, мВ	441	553	494	493	26,7		
ЕС, мСм/см	9	96	60	43	78,1		
Ca ²⁺	1,40	17,71	8,53	7,62	3,8	10,1	20,9
Mg ²⁺	0,40	24,89	1,87	1,42	2,9	2,2	29,4
Na ⁺	0,01	110,0	3,06	1,41	12,2	3,6	129,7
K ⁺	0,10	2,10	0,47	0,41	0,3	0,5	2,5
NH ₄ ⁺	0,60	12,0	1,85	1,50	1,7	2,2	14,2
HCO ₃ ⁻	10,72	87,4	31,17	28,80	12,6	36,8	103,1
SO ₄ ²⁻	0,70	104,0	3,17	1,80	11,5	3,7	122,6
Cl ⁻	1,11	133,9	5,28	3,42	14,7	6,2	157,9
NO ₂ ⁻	0,01	1,00	0,38	0,28	0,2	0,4	1,2
NO ₃ ⁻	0,86	2,50	1,43	1,40	0,3	1,7	2,9
Минерализация	14,68	74,41	41,61	35,77	45,6	35,3	63,1
Химический состав (формула Курлова)	C 67 Cl 20 S 9 NO ₃ 3 NO ₂ 1 Ca 52 Mg 19 Na 16 NH ₄ 12 K 1						

*Содержание: $C_{\min.}$ — минимальное; $C_{\max.}$ — максимальное; $C_{\text{арифм.}}$ — среднее арифметическое; $C_{\text{геом.}}$ — среднее геометрическое.

вый тренд повышения (рис. 2). Минерализации растворимой фазы снежного покрова увеличилась с 12–16 мг/л в 2008–2010 гг. до 20–24 мг/л в 2015–2019 гг. в основном за счёт гидрокарбонатов. При относительно постоянном объёме выбросов в атмосферу стационарными источниками в Якутске в 2008–2019 гг. повышение концентрации гидрокарбонатов связано с региональным переносом углекислого газа [11] и, как следствие, с относительным ростом кислотности снежного покрова (рис. 3).

Объёмы выбросов микрополлютантов значительно ниже, чем макрокомпонентов, но существенно выше по токсичности и уровню концентрирования ($KK = 10 \div 100$) в снежном покрове. Распределение химических элементов (макро- и микроэлементов, редких, рассеянных и радиоактивных) в растворимой фазе снежного покрова и величина газовой-аэрозольной нагрузки приведены в табл. 3. Величина газовой-аэрозольной нагрузки макроэлементов растворимой фазы снега колеблется от 0, n (Mg, S, K, Si, Al) до n (Cl, N, Na) и 10 n мг/(м²·сут.) для C и Ca — основных компонентов зимних атмосферных выпадений. Величина P_n (количество выпадений за единицу времени на единицу площади)

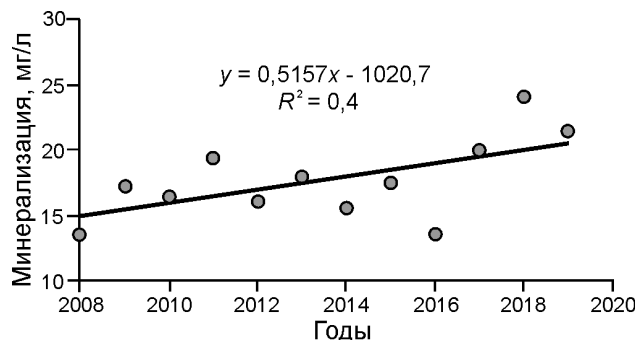


Рис. 2. Динамика минерализации растворимой фазы снежного покрова на стационаре «Туймаада» (2008–2019 гг.)

Fig. 2. Dynamics of salinity of the soluble phase of the snow cover on the of «Tuymaada» station (2008–2019)

микроэлементов изменяется от 0,0 n (F, Ba, P, Mn, Fe, Cu, Zn, Sr) до минимальных значений 0,00000 n (Be, Ag, Tl, Th, Pt, Au) мг/(м²·сут.) (см. табл. 3). По данным авторов, газовой-аэрозольная нагрузка растворимой фазы снега составляет примерно 0,2% от выпадений в твердой фазе снежного покрова.

Экологическая оценка аэрозольной нагрузки на территорию города в холодное время года выполнена путём сравнения concentra-

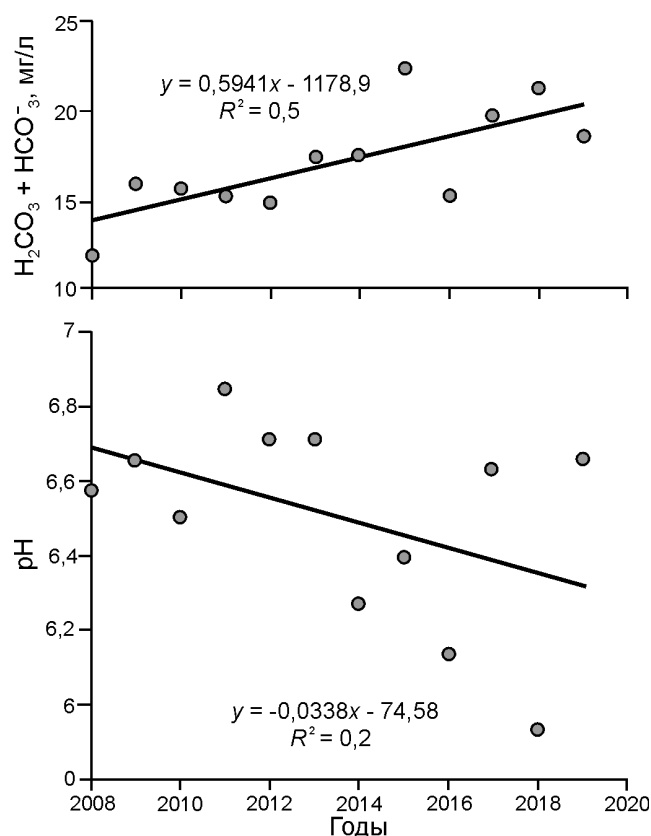


Рис. 3. Динамика концентрации ионов $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-$ и pH в растворимой фазе снежного покрова на стационаре «Туймаада» (2008–2019 гг.).

Fig. 3. Dynamics of $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^-$ and pH concentration in the soluble phase of the snow cover on the of Tuy-maada station (2008–2019)

ции элементов в снежном покрове с рыбохозяйственными санитарными нормами природных вод [12]. По степени убывания контрастности экологической нагрузки химические элементы жидкой фазы снега образуют следующий ряд ($C_{\text{средн}}/C_{\text{max}}/\text{ПДК}$): Cu (23/170) > Fe (1,5/80) > Cd (5/28) > Sn, Zn, Al (2/12) > Sn (0,3/16) > Mn (0,3/5) > B, Pb, Mo (0,3/2).

Токсичные микроэлементы – Fe (рис. 4), Cu, Zn, U – формируют обширные ореолы в центральной части города или локальные точечные аномалии Cd, As, Th на его территории. Оценка загрязнения снега токсичными элементами по суммарному показателю загрязнения снежного покрова Z_c (табл. 4), отражающему их распределение в воздушном бассейне Якутска, проведена по известной оценочной шкале [1]. Уровень загрязнения снежного покрова по суммарному показателю загрязнения снежного покрова практически

Таблица 3. Содержание химических компонентов в снежном покрове и величина газово-аэрозольной нагрузки P_n на территорию г. Якутск (зима 2020 г.)*

Элементы	$C_{\text{мин.}}$	$C_{\text{макс.}}$	$C_{\text{арифм.}}$	P_n , мг/(м ² ·сут.)	
				мини-мальная	макси-мальная
B	0,9	33,8	5,4	0,0046	0,029
Al	15	448	95	0,11	0,53
Si	30	580	164	0,19	0,68
P	20	151	22	0,019	0,13
S	207	30117	1096	1,29	35,52
Ti	0,4	11,3	2,2	0,003	0,013
V	0,1	1,0	0,4	0,0004	0,003
Cr	0,4	2,0	0,4	0,0004	0,003
Mn	13,3	53,7	30,6	0,036	0,063
Fe	3,5	409,4	73,0	0,086	0,483
Co	0,1	0,8	0,2	0,00018	0,00095
Ni	0,1	1,6	0,2	0,00018	0,00095
Cu	13,1	172,2	23,1	0,027	0,203
Zn	4,4	132,0	11,4	0,013	0,156
Ga	0,0	7,5	0,1	0,0001	0,0005
Ge	0,0	7,5	0,1	0,0001	0,0005
As	0,0	7,5	0,7	0,0008	0,0088
Se	0,2	0,2	0,2	0,00018	0,00095
Br	3,5	27,2	5,4	0,0064	0,032
Sr	9	74	32	0,038	0,087
Ba	3	44	13	0,016	0,051
Pb	0,3	12,5	1,4	0,0016	0,0147
Li	127,8	6702,1	472,6	0,0004	0,0057
Be	3,0	23,2	4,6	0,000004	0,000027
Rb	170,3	1464,7	492,2	0,00041	0,0012
Y	8,1	669,0	66,4	0,000056	0,00057
Zr	12,0	363,1	76,6	0,000065	0,00031
Nb	1,5	20,5	4,6	0,000004	0,000017
Mo	78,9	691,3	217,6	0,00018	0,00057
Ag	2,3	29,6	2,9	0,0000025	0,000025
Cd	12,2	141,2	31,4	0,000027	0,00012
Sn	9,2	1845,9	67,5	0,000057	0,00156
Sb	48,8	5114,0	406,6	0,00034	0,0043
Cs	3,5	62,4	13,4	0,000011	0,000053
W	4,1	445,4	98,2	0,000083	0,00038
Pt	0,3	0,3	0,3	0,0000003	
Au	1,1	1,1	1,1	0,0000009	
Tl	0,9	6,6	2,8	0,0000024	0,0000056
Bi	3,4	56,9	14,9	0,000013	0,000048
Th	0,9	25,0	7,6	0,0000064	0,000021
U	8,6	844,5	67,8	0,00057	0,00072

*Содержание $C_{\text{мин.}}$, $C_{\text{макс.}}$ и $C_{\text{арифм.}}$ дано в мкг/л, Li – U – в нг/л.

на всей территории города оценивается как низкий и умеренно опасный (рис. 5). Локальная контрастная аномалия Z_c в юго-западной части города расположена в районе строительства новых

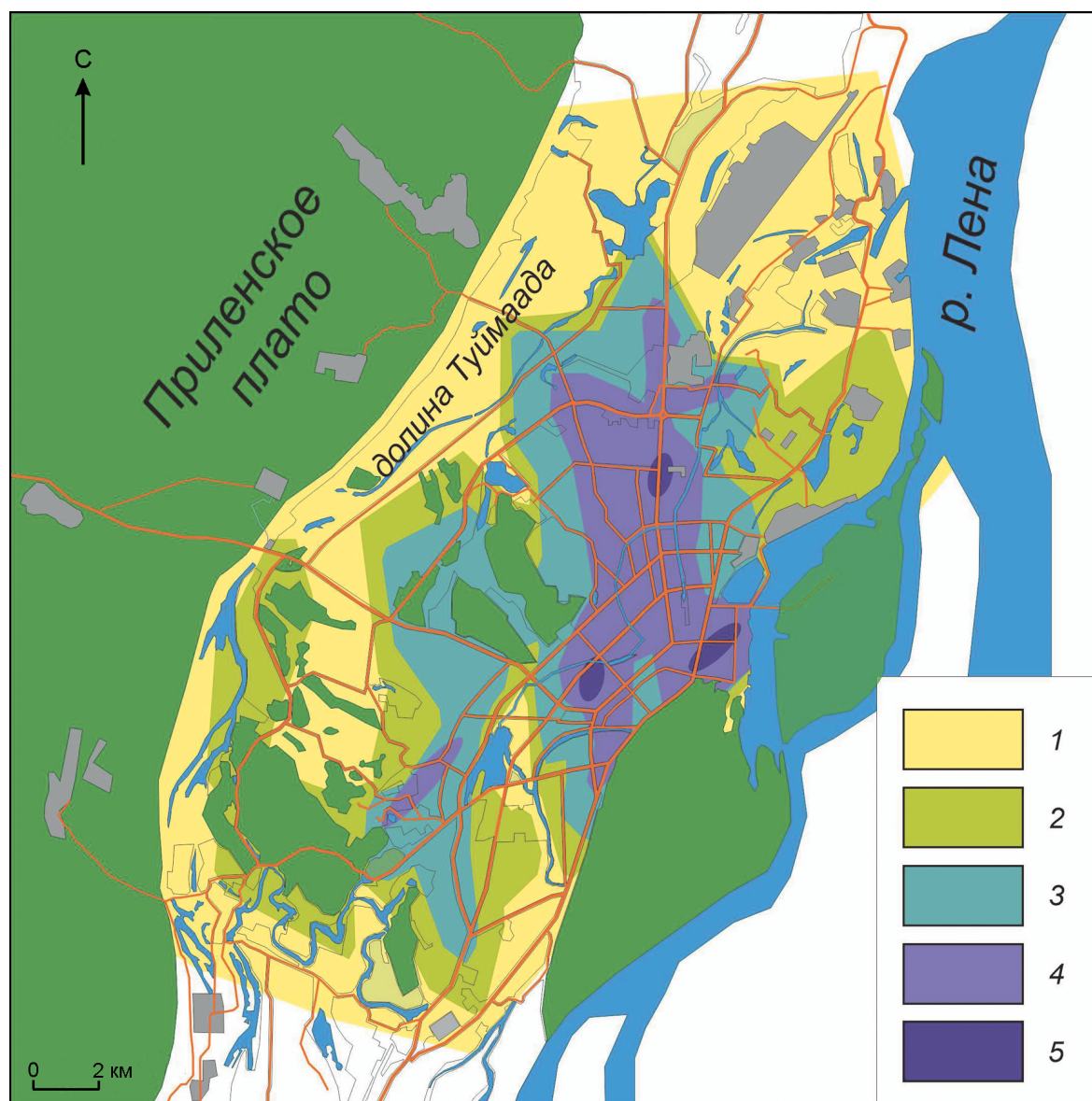


Рис. 4. Концентрации Fe в растворимой фазе снега на территории г. Якутск, мкг/л:

1 – 10–30; 2 – 30–50; 3 – 50–100; 4 – 100–200; 5 – > 200

Fig. 4. Concentrations of Fe in the soluble phase of snow on the territory of Yakutsk, $\mu\text{g/l}$:

1 – 10–30; 2 – 30–50; 3 – 50–100; 4 – 100–200; 5 – > 200

жилых кварталов и пересечения улиц с интенсивными транспортными потоками. Коэффициент Z_c , рассчитанный для различных функциональных зон города, показал, что наиболее загрязнена транспортная зона, основной вклад в загрязнение которой вносят Cu, Al, Mn и Fe. О преобладающей роли автотранспорта в загрязнении городской территории свидетельствуют и показатели нарушения стабильности развития растений и мутагенной активности почв [13]. Минимальные значения Z_c отмечали в парково-рекреационной

зоне города, основной загрязнитель которой – Zn, возможно, за счёт выбросов ремонтных мастерских, расположенных в южной части парка.

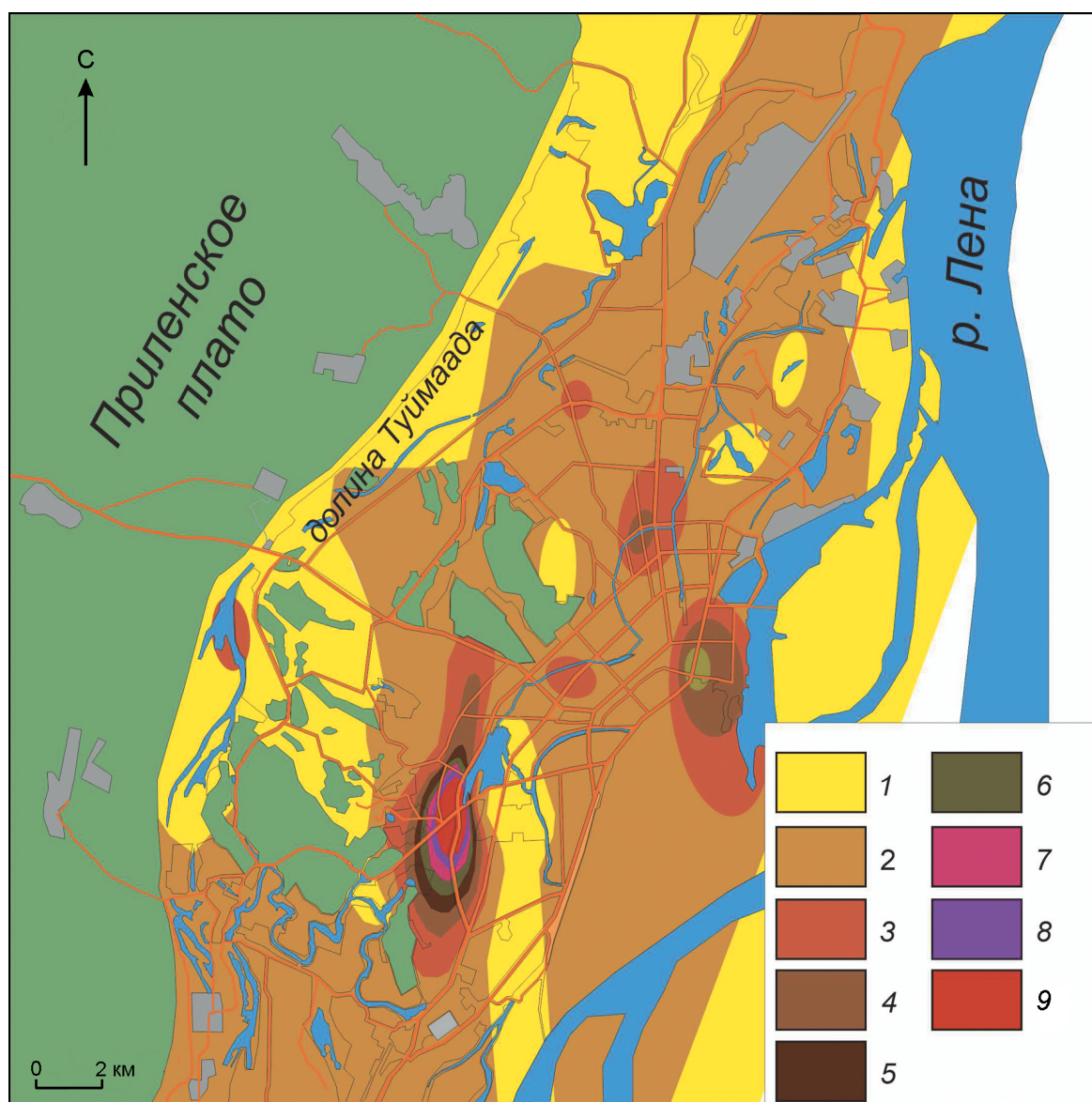
По сравнению со средним содержанием тяжёлых металлов в растворимой фазе (в зимней атмосфере) снежного покрова ряда городов Восточной Сибири (Благовещенск, Братск, Иркутск, Чита) Якутск менее загрязнён рассматриваемыми микроэлементами (табл. 5). Во всех перечисленных населённых пунктах, кроме Якутска, расположены крупные промышленные предприятия,

Таблица 4. Уровень загрязнения снежного покрова на территории г. Якутск (зима 2020 г.)

Уровень	Суммарный показатель загрязнения снежного покрова Z_c [1]	Территория города, %
Низкий	< 32	48
Средний, умеренно опасный	32–64	50
Высокий, опасный	64–128	1
Очень высокий, очень опасный	128–256	1
Максимальный, чрезвычайно опасный	> 256	–

Таблица 5. Среднее содержание тяжёлых металлов в растворимой фазе снежного покрова в городах Восточной Сибири

Города	Содержание тяжёлых металлов, мкг/л				Источник
	Zn	Cd	Pb	Cu	
Якутск ($n = 80$)	11,4	0,031	1,4	23,1	Авторы
Чита ($n = 68$)	257	2,2	69,3	37,6	[4]
Благовещенск ($n = 10$)	9,8	0,020	0,34	4,7	[2]
Иркутск ($n = 22$)	40	0,10	0,5	70	[3]
Братск ($n = 22$)	10,1	31,3	0,64	1,55	

Рис. 5. Суммарный показатель загрязнения снежного покрова на территории г. Якутск Z_c : 1 – < 3; 2 – 30–40; 3 – 40–50; 4 – 50–60; 5 – 60–70; 6 – 70–80; 7 – 80–90; 8 – 90–100; 9 – > 100Fig. 5. Total Snow Cover Pollution Index on the territory of Yakutsk Z_c :

1 – < 30; 2 – 30–40; 3 – 40–50; 4 – 50–60; 5 – 60–70; 6 – 70–80; 7 – 80–90; 8 – 90–100; 9 – > 100

поэтому эти города характеризуются высоким и очень высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха [14]. Несмотря на неблагоприятные природные факторы, среди которых геоморфологические (расположение города в котловине) и климатические (северо-западные направления ветров), а также температурная инверсия и длительные штили в зимний период, атмосфера Якутска менее насыщена тяжёлыми металлами. Техногенная нагрузка обусловлена в основном автотранспортом; кроме того, в отличие от большинства перечисленных городов энергетические объекты в Якутске работают на газе. Уровень загрязнения тяжёлыми металлами снежного покрова Якутска близок к показателям Благовещенска — города с развитой промышленностью и работающей на угле ТЭЦ. Отметим и региональные особенности загрязнения: продолжительность зимнего периода в Якутске больше, чем в Благовещенске; длительные штили затрудняют рассеивание токсичного смога; высокая концентрация основного источника аэрозольных выбросов — автотранспорта — отмечается на ограниченной территории; субстрат долины «Туймаада» обогащён халькофильными элементами.

Заключение

Фоновый химический состав растворимой фазы снежного покрова в районе Якутска типичен для среднетаёжных ландшафтов Якутии: хлоридно-гидрокарбонатный, смешанный по составу катионов с преобладанием кальция, с кислой

реакцией ($\text{pH} = 5,13$) и очень низкой минерализацией — около 6 мг/л. В зоне техногенного воздействия городского хозяйства химический состав снеговых вод остаётся хлоридно-гидрокарбонатным. Минерализация повышается за счёт роста концентрации сульфатов, кальция и аммония; реакция снеговых вод города переходит в нейтральный интервал. Экологическое неблагополучие в центральной части города обусловлено техногенными, климатическими и геоморфологическими факторами. Величина газовой и аэрозольной нагрузки в районе города по данным длительного мониторинга снежного покрова имеет устойчивый тренд повышения в основном за счёт поступления гидрокарбонатов при региональном переносе углекислого газа.

В зимней атмосфере города формируются техногенные геохимические аномалии тяжёлых металлов, редких и радиоактивных элементов. Наиболее контрастная техногенная трансформация в пределах города наблюдается для Cu, Fe, Cd, Sn, Zn и Al. Токсичные микроэлементы формируют обширные ореолы в центральной части города (Cu, Fe, Zn, U) или локальные точечные аномалии (Cd, As, Th) на его территории. Уровень загрязнения зимней атмосферы практически на всей территории города по суммарному показателю загрязнения снежного покрова оценивается как низкий и умеренно опасный в зонах интенсивного движения транспорта и вблизи объектов энергетики. По сравнению с рядом сибирских городов снежный покров (зимняя атмосфера) на территории Якутска менее загрязнён тяжёлыми металлами.

Литература

References

1. Саёт 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.
2. Радомская В.И., Юсупов Д.В., Павлова Л.С., Сергеева А.Г., Бородин Н.А. Многомерный статистический анализ содержаний элементов в снеговом покрове г. Благовещенска // Региональная экология. 2018. № 2 (52). С. 15–28.
3. Гребенщикова В.И. Геохимическая специфика состава снеговой воды некоторых городов Иркутской области // Вода: химия и экология. 2013. № 2. С. 19–25.
4. Бондаревич Е.А., Коцюржинская Н.Н., Жилиева О.А., Самойленко Г.Ю., Климович К.И., Игумнов С.А. Мо-
1. Sayet Yu.Ye., Revich B.A., Yanin Ye.P., Smirnova R.S., Basharkevich I.L., Onishchenko T.L., Pavlova L.N., Trefilova N.Ya., Achkasov A.I., Sarkisyan S.Sh. *Geokhimiya okruzhayushchey sredy*. Geochemistry of the environment. M.: Nedra, 1990: 335 p. [In Russian].
2. Radomskaya V.I., Yusupov D.V., Pavlova L.M., Sergeeva A.G., Borodina N.A. Multidimensional statistical analysis of the contents of elements in the snow cover of Blagoveshchensk. *Regional'naya ekologiya*. Regional ecology. 2018, 2 (52): 15–28. [In Russian].
3. Grebenshchikova V.I. Geochemical specificity of the composition of snow water in some cities of the Irkutsk region. *Voda: khimiya i ekologiya*. Water: chemistry and ecology. 2013, 2: 19–25. [In Russian].
4. Bondarevich Ye.A., Kotsyurzhinskaya N.N., Zhilyayeva O.A., Samoylenko G.Yu., Klimovich K.I., Igum-

- нитинг загрязнения снежного покрова г. Читы тяжелыми металлами // Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2018. Т. 8. № 2. С. 132–144. doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-2-132-144.
5. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А., Чернов С.Ю., Тимонин В.А. Элементарное введение в геостатистику // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. 1999. № 11. 136 с.
 6. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С., Глазырин В.В., Заварзин А.В., Замай С.С., Лурье И.К., Охонин В.А., Пырьев В.И., Рылский И.А., Семин В.И., Серапинас Б.Б., Симонов А.В., Трофимов А.М., Флейс М.Э., Якубайлик О.Э., Яровых В.Б. Геоинформатика / Под ред. В.С. Тикунова. М.: Академия, 2005. 480 с.
 7. Григорьев А.А., Будыко М.И. Классификация климатов СССР // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1959. № 3. С. 3–19.
 8. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Evolution of the thermal state of permafrost under climate warming in Central Yakutia // The Holocene. 2019. V. 29. № 9. P. 1401–1410. doi: 10.1177/0959683619855959.
 9. Государственный доклад о состоянии и охране окружающей среды Республики Саха (Якутия) в 2018 г. Правительство РС (Я), Министерство охраны природы РС (Я), 2019. 61 с.
 10. Макаров В.Н. Геохимия снежного покрова таёжных и горных мерзлотных ландшафтов Якутии // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 73–80.
 11. Makarov V.N. The impact of climate warming and revenues greenhouse gas migration of H^+ in the biosphere Yakutia. Cold-region hydrology in a non-stationary world. 21st Northern Research Basins Symposium and Workshop. Yakutsk, Russia, August 6–12, 2017. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute Press, 2017. P. 75–81.
 12. ГН 2.1.5.1315–03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования). М.: Минздрав России, 2003 (с изменениями на 13.07.17). 628 с.
 13. Шадрина Е.Г., Солдатова В.Ю., Пудова Т.М. Биоиндикационная оценка состояния среды на территории г. Якутска // Прикладная экология г. Якутска: Сб. науч. тр. Новосибирск: Наука, 2017. С. 102–113.
 14. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. 844 с.
 - nov S.A. Monitoring of snow cover pollution in Chita with heavy metals. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya khimiya i biotekhnologiya*. Proc. of universities. Applied chemistry and biotechnology. 2018, 8 (2): 132–144. doi: 10.21285/2227-2925-2018-8-2-132-144. [In Russian].
 5. Kanevskiy M.F., Dem'yanov V.V., Savel'yeva Ye.A., Chernov S.Yu., Timonin V.A. Elementary introduction to geostatistics. *Problemy okruzhayushchey sredy i prirodnikh resursov*. Environmental and natural resource issues. 1999, 11: 136 p. [In Russian].
 6. Kapralov Ye.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S., Glazyrin V.V., Zavarzin A.V., Zamay S.S., Lurie I.K., Okhonin V.A., Pyryev V.I., Rylsky I.A., Semin V.I., Serapinas B.B., Simonov A.V., Trofimov A.M., Fleis M.E., Yakubailik O.E., Yarovykh V.B. *Geoinformatika*. Geoinformatics. Ed. V.S. Tikunov. M: Akademiya, 2005: 480 p. [In Russian].
 7. Grigor'yev A.A., Budyko M.I. Classification of climates of the USSR. *Izv. AN SSSR. Seriya geograficheskaya*. Izvestia of the USSR Academy of Sciences. Geographic series. 1959, 3: 3–19. [In Russian].
 8. Varlamov S.P., Skachkov Y.B., Skryabin P.N. Evolution of the thermal state of permafrost under climate warming in Central Yakutia. *The Holocene*. 2019, 29 (9): 1401–1410. doi: 10.1177/0959683619855959.
 9. *Gosudarstvennyy doklad o sostoyanii i okhrane okruzhayushchey sredy Respubliki Sakha (Yakutiya) v 2018 g.* State report on the state and protection of the environment of the Republic of Sakha (Yakutia) in 2018. Pravitel'stvo RS (YA), Ministerstvo okhrany prirody RS (YA). 2019: 61 p. [In Russian].
 10. Makarov V.N. Geochemistry of the snow cover of taiga and mountain permafrost landscapes of Yakutia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 73–80. [In Russian].
 11. Makarov V.N. The impact of climate warming and revenues greenhouse gas migration of H^+ in the biosphere Yakutia. Cold-region hydrology in a non-stationary world. 21st Northern Research Basins Symposium and Workshop. Yakutsk, Russia, August 6–12. 2017. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute Press, 2017: 75–81.
 12. ГН 2.1.5.1315–03. *Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaystvenno-pit'yevogo i kul'turno-bytovogo vodopol'zovaniya*. Maximum permissible concentration (MPC) of chemical substances in the water of water bodies for household and drinking and cultural and household water use. M.: Minzdrav Rossii, 2003 (s izmeneniyami na 13.07.17): 628 p. [In Russian].
 13. Shadrina E.G., Soldatova V.Yu., Pudova T.M. Bioindication assessment of the state of the environment in the territory of Yakutsk. *Prikladnaya ekologiya goroda Yakutsk: Sb. Nauchnykh trudov*. Applied ecology of Yakutsk: collection of scientific papers. Novosibirsk: Science, 2017: 102–113. [In Russian].
 14. *Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ob okhrane okruzhayushchey sredy Rossiyskoy Federatsii v 2018 godu»*. State report «On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2018». M.: Ministry of Natural Resources of Russia; NPP «Cadastre», 2019: 844 p.