

ИОННЫЙ СОСТАВ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

© 2024 г. А. В. Салтыков^{1*}, С. Н. Балыкин¹, Д. Н. Балыкин¹, И. В. Горбачев²

¹Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия;

²Филиал АО «Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры» – «НИИ ПМ им. академика В. И. Кузнецова», Москва, Россия

*e-mail: saltykovav@yandex.ru

Поступила 15 ноября 2023 г.

После доработки 22 марта 2024 г.

Принята к печати 10 апреля 2024 г.

Представлены результаты многолетних (с 2007 по 2021 г.) исследований ионного состава снежного покрова в труднодоступных равнинных и горных ландшафтах Сибири (Кетско-Тымская и Центрально-Якутская низменности, Северо-Западный и Северо-Восточный Алтай, Западный Саян, Алданское нагорье) и Дальнего Востока России (Становой хребет, Турана-Буреинский горный массив, Сунтар-Хаята и Сихотэ-Алинь).

Ключевые слова: ионы, глобальные фоновые концентрации, снежный покров, высокогорье, болота, тайга, Сибирь, Дальний Восток

DOI: 10.31857/S2076673424020092

ВВЕДЕНИЕ

Северная Азия – крупнейший макрорегион на севере Евразии (8.8% от общей площади суши Земли) (Bridges, 1990) с большим разнообразием орографических структур, которые оказывают влияние на местные климатические условия и, следовательно, на формирование снежного покрова. В зависимости от принадлежности водосборных бассейнов рек к Северному Ледовитому или Тихому океанам всю её территорию можно разделить на две части – Сибирь и Дальний Восток России соответственно.

Рельеф Сибири – огромный амфитеатр, открытый к Северному Ледовитому океану и разделённый Среднесибирским плоскогорьем и Верхоянской горной страной на воздушные «карманы» – Западно-Сибирскую и Центрально-Якутскую равнины, Колымскую низменность и другие. Горное обрамление этого амфитеатра состоит из Уральской, Алтае-Саянской и Байкальской горных стран, Станового нагорья, хребтов Джугджур и Сунтар-Хаята, а также Колымского и Чукотского нагорий. Крайнее размещение горных массивов на западе, юге и востоке Сибири, а также её открытость с севера обеспечивают большое влияние Северного Ледовитого океана и отчасти Атлантического, а также ограничивают влияние Тихого океана и Центральной Азии. Снегонакопление на всей территории Сибири происходит в течение 150–270 дней. В результате мощность снежного

покрова в лесной зоне Западно-Сибирской равнины превышает 50–60 см, в тундровой снижается до 40–50 см, а в степной – до 25–30 см. В предгорьях и низкогорьях Алтае-Саянской горной страны его мощность может достигать 200–300 см (Архипов и др., 1970; Трофимов, 1975; Танасиенко, Чумбаев, 2008). Несмотря на длительные зимы, а также на практически полное отсутствие оттепелей, мощность снежного покрова на Центрально-Якутской равнине и в предгорьях Саян в конце зимы составляет менее 30 см, на Крайнем Севере в связи с увеличением циклонической деятельности она возрастает до 40–50 см, а ближе к долине р. Енисей становится более 80 см. Высота снежного покрова на побережье моря Лаптевых составляет около 30 см, к востоку и югу она увеличивается до 60–70 см, а на северных хребтах Колымского и Чукотского нагорий – до 100–150 см (Кононова, 2012; Максюткова, 2012; Трофимова, Бадыбина, 2012; Максюткова, 2013).

В отличие от Сибири, Дальний Восток России представляет собой прибрежную полосу, омываемую морями Тихого океана с одной стороны и прилегающими к ней склонами Станового хребта, Колымского и Чукотского нагорий, а также хребтов Джугджур и Сунтар-Хаята – с другой. Тем не менее, как и в Сибири, здесь имеются воздушные «карманы» – Анадырская низменность, долина р. Амур и другие более мелкие. Формирование мощного снежного покрова (более 60 см) на территории Анадырской

низменности и особенно на склонах хребтов Корякского нагорья связано с влиянием циклонов северной части Тихого океана и его морей. В долине р. Амур, наоборот, зима отличается малоснежностью (мощность снежного покрова не превышает 20–40 см) за счёт холодных сухих воздушных масс из Средней Сибири, для которых среднегорные хребты Станового нагорья не являются препятствием (Коршунова и др., 2021).

Снежный покров — основное звено в миграции многих ионов на Земле. В течение всего периода снегонакопления он аккумулирует их из воздуха, а во время таяния происходит интенсивное поступление накопленных ионов в другие объекты биогeoценоза (почву, поверхностные воды, растения и др.). Изучение этого процесса имеет важное значение для глобального контроля и прогнозирования загрязнения, особенно в северных и высокогорных регионах (Глазовский и др., 1983; Василенко и др., 1985; Лосев и др., 1993; Kaasik et al., 2000; Войтов и др., 2000; Тентюков, 2007; Горюнова и др., 2007; Макаров, 2007; Василевич и др., 2011; Алексеев, 2013).

К наиболее распространённым ионам в снежном покрове относятся Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- и NO_2^- (Потапова, Макаров, 2017; Игнатенко, Рябов, 2021). Присутствие в нём ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в большей степени обусловлено седиментацией твёрдых частиц в результате ветровой эрозии и дальнейшим их растворением (Василевич и др., 2011), обычно имеет локальный характер распространения. Количество ионов HCO_3^- в снежном покрове определяется концентрацией CO_2 в атмосфере (Ступникова, Салихова, 2016). Ион Cl^- в незагрязнённых атмосферных осадках, в основном, морского генезиса (Алекин, 1953; Морарь, 2003). Ионы SO_4^{2-} накапливаются в снеге за счёт осаждения аэрозолей диоксида серы из воздуха вместе с пылью под действием сил гравитации, а также в результате выветривания засоленных почв на морском побережье (Морарь, Чертищева, 2007; Карамышева, 2017). Ионы NH_4^+ , NO_3^- и NO_2^- постоянно выделяются в незамерзающих приозёрных и заболоченных биогeoценозах. Обычно нитрит-ионов в снежном покрове обнаруживается очень мало, так как в зимнее время происходит затухание процесса нитрификации (Морарь, 2003).

Исследования ионного состава снежного покрова проводятся, в основном, вокруг городов и промышленных центров, что естественно, так как именно здесь происходит интенсивное загрязнение атмосферы (Микушин и др., 2006; Асфандиярова и др., 2013; Еремин и др., 2015; Ступникова, Салихова, 2016; Игнатенко, Рябов, 2021). Мониторинг фоновых концентраций ионов в снежном покрове на территории РФ осуществляет Росгидромет, который имеет большое количество метеостанций как в Сибири, так и на Дальнем Востоке. Тем не менее все они так или иначе приурочены к населённым пунктам, а значит

не охватывают труднодоступные территории, где по многим причинам невозможно организовать постоянное наблюдение.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования ионного состава снежного покрова в труднодоступных ландшафтах Северной Азии были выбраны 11 мониторинговых регионов (рисунк). Все они расположены в границах охотничьих угодий и заповедников вдали от населённых пунктов и промышленных объектов, с ними нет постоянного автотранспортного сообщения (табл. 1). Основное влияние на состояние ландшафтов этих территорий оказывает атмосферный перенос загрязняющих примесей, воздействие которых отражается в ионном составе снежного покрова.

В каждом мониторинговом регионе с учётом вероятного распространения загрязнителей окружающей среды, метеорологических условий, рельефа местности, транспортной доступности (возможностей для посадки вертолёта) и ландшафтно-геохимических особенностей территории были выбраны по 3–15 мониторинговых площадок, в которых в свою очередь отбирали по пять образцов снега в период максимального снегонакопления на всю глубину снежного покрова (Методические рекомендации ..., 1990). Их помещали в пластиковые куботейнеры с плотно прилегающими крышками для доставки в химическую лабораторию с помощью авиа- или автотранспорта (в зависимости от удалённости места отбора проб).

Доставленные в химическую лабораторию образцы снега растапливали в закрытых куботейнерах при комнатной температуре и отфильтровывали через мембранный фильтр с порами диаметром 0.45 мкм.

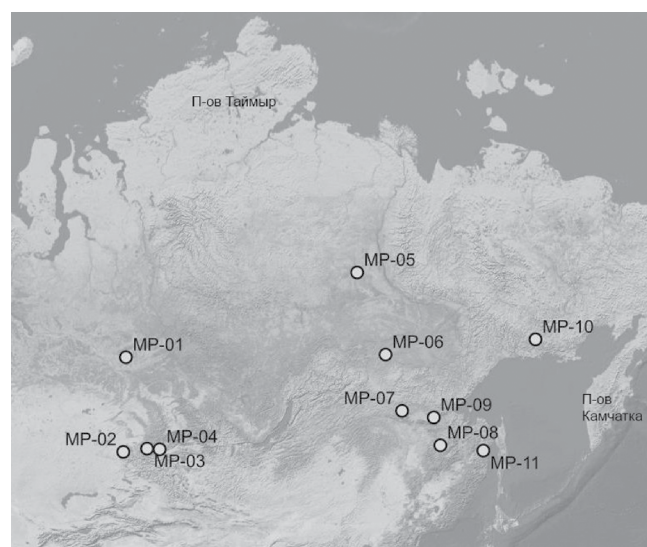


Рис. Местоположение мониторинговых регионов
Fig. Location of the monitoring regions

Таблица 1. Описание мониторинговых регионов

Название региона	Шифр региона	Описание	Количество площадок
Кетско-Тымский	МР-01	Равнинные болотно-лесные ландшафты Кетско-Тымской низменности. Бассейн р. Кети.	5
Тигирецкий	МР-02	Высокогорные альпийские ландшафты Тигирецкого хребта. Бассейн р. Чарыш.	3
Иолго-Сумультинский	МР-03	Высокогорные альпийские ландшафты Сумультинского хребта и хребта Иолго. Бассейн р. Бии.	7
Абакано-Шапшальский	МР-04	Высокогорные альпийские ландшафты Абаканского и Шапшальского хребта. Бассейн рр. Абакан, Хемчик и Чулышман.	13
Центрально-Якутский	МР-05	Равнинные болотно-лесные ландшафты Центрально-Якутской низменности. Бассейн р. Тюнг.	8
Алданский	МР-06	Низкогорные лесные ландшафты Алданского нагорья. Бассейн рр. Амга, Алдан и Туолба.	15
Верхнезейско-Становой	МР-07	Низкогорные лесные и пойменные ландшафты Станового хребта. Бассейн р. Зеи.	10
Турана-Буреинский	МР-08	Среднегорные лесные и высокогорные субальпийские ландшафты Буреинского хребта и хребта Турана. Бассейн р. Буреи.	8
Удско-Становой	МР-09	Среднегорные и высокогорные долинные ландшафты Станового хребта. Бассейн р. Уды.	12
Сунтар-Хаятанский	МР-10	Среднегорные лесные и высокогорные альпийские ландшафты хребта Сунтар-Хаята. Бассейн рр. Яна и Хурэн.	10
Сихотэ-Алинский	МР-11	Низкогорные лесные и пойменные ландшафты Сихотэ-Алиня. Бассейн р. Яй.	7

В отфильтрованных образцах снеговой талой воды определяли кислотность, минерализацию, концентрацию основных (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-}) и азотсодержащих (NH_4^+ , NO_2^- и NO_3^-) ионов с использованием общепринятых стандартных методик (Пузанов и др., 2022).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кислотность и минерализация. За весь период наблюдения (с 2007 по 2022 г.) кислотность снежного покрова в мониторинговых регионах изменялась несущественно (табл. 2). Наиболее низкие значения pH обнаружены в образцах из Турана-Буреинского (2014 г. — 4.34), Сихотэ-Алинского (2014 г. — 4.68) и Кетско-Тымского (2009 г. — 4.98) регионов, а наиболее высокие — из Абакано-Шапшальского (2008 г. — 6.60) и Иолго-Сумультинского (2015 г. — 6.74) регионов. Несмотря на незначительные колебания этого показателя можно заметить, что более

высокие величины pH определены в пробах из высокогорных мониторинговых регионов, а более низкие — из равнинных.

Минерализация снежного покрова во многих мониторинговых регионах за весь период наблюдения оставалась приблизительно на одном уровне (от 10 до 35 мг/л). Исключение среди них — Иолго-Сумультинский и Абакано-Шапшальский районы, где в период с 2009 по 2011 г. в пробах обнаружены самые высокие значения этого показателя (61 и 42 мг/л соответственно). Таким образом, повышенной минерализацией отличаются образцы из горных (особенно высокогорных) мониторинговых регионов, где в зимнее время часто встречаются оголённые участки коренных пород, способствующие увеличению пылевой нагрузки на снежный покров.

По результатам анализа кислотности и минерализации отобранных образцов снеговые талые воды мониторинговых регионов относятся к ультрапресным кислым, слабокислым и нейтральным

Таблица 2. Кислотность и минерализация снеговых талых вод мониторинговых регионов

Шифр региона	Кислотность (рН)	Минерализация, мг/л
МР-01	$\frac{4.98 (2009 \text{ г.}) - 5.54 (2013 \text{ г.})}{5.28 \pm 0.15^{**}}$	$\frac{9.7 (2014 \text{ г.}) - 21.3 (2010 \text{ г.})}{16.7 \pm 3.0}$
МР-02	$\frac{5.80 (2009 \text{ г.}) - 6.51 (2008 \text{ г.})}{6.15 \pm 0.18}$	$\frac{12.4 (2018 \text{ г.}) - 35.6 (2010 \text{ г.})}{18.8 \pm 4.6}$
МР-03	$\frac{5.29 (2019 \text{ г.}) - 6.74 (2015 \text{ г.})}{5.99 \pm 0.26}$	$\frac{12.0 (2019 \text{ г.}) - 61.5 (2010 \text{ г.})}{22.8 \pm 10.4}$
МР-04	$\frac{5.75 (2012 \text{ г.}) - 6.60 (2008 \text{ г.})}{6.04 \pm 0.20}$	$\frac{10.1 (2019 \text{ г.}) - 41.3 (2011 \text{ г.})}{20.1 \pm 10,3}$
МР-05	$\frac{5.54 (2017 \text{ г.}) - 6.05 (2018 \text{ г.})}{5.80 \pm 0.25}$	$\frac{10.8 (2017 \text{ г.}) - 11.2 (2018 \text{ г.})}{11.0 \pm 0,2}$
МР-06	$\frac{5.77 (2014 \text{ г.}) - 6.05 (2017 \text{ г.})}{5.91 \pm 0,09}$	11.4 (2018 г.)
МР-07	$\frac{5.47 (2019 \text{ г.}) - 5.88 (2014 \text{ г.})}{5.68 \pm 0.12}$	$\frac{13.8 (2018 \text{ г.}) - 20.4 (2014 \text{ г.})}{17.1 \pm 1.9}$
МР-08	4.34 (2014 г.)	Не определяли
МР-09	5.38 (2014 г.)	17.3 (2014 г.)
МР-10	$\frac{5.42 (2014 \text{ г.}) - 5.80 (2013 \text{ г.})}{5.61 \pm 0.19}$	$\frac{23.4 (2014 \text{ г.}) - 29.0 (2013 \text{ г.})}{26.2 \pm 2.8}$
МР-11	4.68 (2014 г.)	Не определяли

Примечание. *В числителе представлены минимальное и максимальное значения показателя; **в знаменателе – среднее арифметическое значение и его ошибка.

(Гусева и др., 2000). Поэтому можно предположить, что в снежном покрове в этих регионах содержание исследуемых ионов очень низкое, с преобладанием в их составе анионов (HCO_3^- , Cl^- и SO_4^{2-}).

Основные ионы. Во всех отобранных образцах снега молярная концентрация катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} оказалась ниже 0.1 моль/л (предел обнаружения использованного титриметрического метода анализа). Молярная концентрация анионов HCO_3^- в анализируемых образцах снега из Кетско-Тымского, Тигирецкого, Иолго-Сумультинского и Абакано-Шапшальского мониторинговых регионов значительно варьировала, при этом можно отчётливо выделить два временных отрезка: до 2012 г. и после (табл. 3). До 2012 г. в этих регионах наблюдались более высокие концентрации рассматриваемого аниона. Начиная с 2012 г. молярная концентрация анионов HCO_3^- в снежном покрове перечисленных выше регионов резко снизилась с 0.26 до 0.06, с 0.28 до 0.08, с 0.35 до 0.06 и с 0.39 до 0.05 моль/л соответственно.

Аналогичная ситуация в снежном покрове мониторинговых регионов наблюдалась для сульфат-ионов, молярная концентрация которых была

также более высокой до 2012 г. Позднее их молярная концентрация снизилась: в Кетско-Тымском МР – с 0.14 до 0.09 моль/л, в Тигирецком – с 0.18 до 0.07 моль/л, в Иолго-Сумультинском – с 0.27 до 0.07 моль/л и в Абакано-Шапшальском – с 0.28 до 0.06 моль/л.

В меньшей степени описанная выше ситуация характерна для хлорид-ионов, молярная концентрация которых только в 2010 г. достигла 0.26 моль/л (Иолго-Сумультинский регион). В остальные годы её значения изменялись от 0.01 (Абакано-Шапшальский и Верхнезейско-Становой регионы в 2019 г.) до 0.17 (Верхнезейско-Становой регион в 2014 г.) моль/л.

Повышенная молярная концентрация анионов HCO_3^- и SO_4^{2-} в снежном покрове мониторинговых регионов связана в большей степени с многочисленными пожарами лесов и торфяников в Сибири и на Дальнем Востоке России (Куценогий и др., 2012), имеющими здесь глобальные масштабы (Сухинин, 2010; Пономарев, 2014; Фурьев и др., 2018; Воронова и др., 2020; Московченко и др., 2020; Латышева и др., 2021; Иванова, Иванов, 2023), а возможно

Таблица 3. Молярная концентрация основных ионов в снеговых талых водах мониторинговых регионов, моль/л

Шифр региона	HCO_3^-	SO_4^{2-}	Cl^-
МР-01	0.06 (2014 г.) – <u>0.26 (2010 г.)</u> * 0.14 ± 0.06**	0.074 (2009 г.) – <u>0.135 (2010 г.)</u> 0.111 ± 0.021	0.022 (2014 г.) – <u>0.070 (2012 г.)</u> 0.061 ± 0.013
МР-02	0.08 (2021 г.) – <u>0.28 (2010 г.)</u> 0.14 ± 0.05	0.070 (2022 г.) – <u>0.178 (2009 г.)</u> 0.103 ± 0.024	0.028 (2021 г.) – <u>0.127 (2010 г.)</u> 0.069 ± 0.023
МР-03	0.06 (2019 г.) – <u>0.35 (2010 г.)</u> 0.14 ± 0.07	0.069 (2021 г.) – <u>0.271 (2010 г.)</u> 0.120 ± 0.046	0.039 (2018 г.) – <u>0.265 (2010 г.)</u> 0.080 ± 0.043
МР-04	0.05 (2015 г.) – <u>0.39 (2009 г.)</u> 0.17 ± 0.11	0.052 (2012 г.) – <u>0.280 (2009 г.)</u> 0.095 ± 0.041	0.014 (2019 г.) – <u>0.210 (2009 г.)</u> 0.075 ± 0.040
МР-05	0.08 (2017 г.) – <u>0.09 (2018 г.)</u> 0.08 ± 0.01	0.065 (2018 г.) – <u>0.066 (2017 г.)</u> 0.066 ± 0.001	0.045 (2017 г.) – <u>0.051 (2018 г.)</u> 0.048 ± 0.003
МР-06	0.09 (2018 г.) – <u>0.11 (2017 г.)</u> 0.10 ± 0.01	0.034 (2014 г.) – <u>0.077 (2017 г.)</u> 0.057 ± 0.014	0.042 (2017 г.) – <u>0.072 (2014 г.)</u> 0.057 ± 0.010
МР-07	0.10 (2015 г.) – <u>0.20 (2019 г.)</u> 0.12 ± 0.02	0.054 (2014 г.) – <u>0.086 (2018 г.)</u> 0.072 ± 0.010	0.010 (2019 г.) – <u>0.168 (2014 г.)</u> 0.083 ± 0.043
МР-08	0.10 (2014 г.)	0.040 (2014 г.)	0.020 (2014 г.)
МР-09	0.10 (2014 г.)	0.127 (2014 г.)	0.053 (2014 г.)
МР-10	0.10 (2014 г.) – <u>0.18 (2013 г.)</u> 0.14 ± 0.04	0.121 (2014 г.) – <u>0.174 (2013 г.)</u> 0.148 ± 0.027	0.020 (2014 г.) – <u>0.029 (2013 г.)</u> 0.025 ± 0.005
МР-11	0.10 (2014 г.)	0.040 (2014 г.)	0.020 (2014 г.)

Примечание. *В числителе представлены минимальное и максимальное значения показателя; **в знаменателе – среднее арифметическое значение и его ошибка.

и в европейской части России (особенно в 2010 г.) (Исаков и др., 2011). Влияние пожаров на снежный покров связано не только с эмиссией газов в атмосферу, которые впоследствии могут долго (до нескольких лет) в ней находиться, но и с распространением золы от обгоревших стволов деревьев и кустарников в зимний период.

Соотношение $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ в снежном покрове показало, что во всех мониторинговых регионах анионы HCO_3^- преобладают над Cl^- (от 1.1 до 20.0 раз) даже вблизи морского побережья Дальнего Востока. Исключением были единичные годы, когда их соотношение снижалось до 0.5 (2015 г., в Абакано-Шапшальском МР) и 0.6 (2014 г., в Верхнезейско-Становом МР) соответственно. Таким образом, влияние пирогенных источников на снежный покров в Удско-Становом, Сунтар-Хаятанском и Сихотэ-Алинском мониторинговых регионах гораздо значительнее, чем морских воздушных масс. Можно выделить три пространственно-временные области, где превышение HCO_3^- особенно ощутимо – с 2008 по 2013 г. (Кетско-Тымский, Тигирецкий и Абакано-Шапшальский мониторинговые регионы) от 3.7 до 6.3, с 2013 по 2014 г. (Турана-Буреинский,

Сунтар-Хаятанский и Сихотэ-Алинский мониторинговые регионы) от 5.0 до 6.0 и с 2017 по 2019 г. (Тигирецкий, Абакано-Шапшальский и Верхнезейско-Становой мониторинговые регионы) от 4.0 до 20.0.

Многолетняя динамика соотношения HCO_3^- с SO_4^{2-} более стабильна, чем с Cl^- , так как эти анионы имеют общие глобальные источники поступления в атмосферу – пирогенные выбросы. Тем не менее можно выделить более высокие значения этого показателя в Абакано-Шапшальском (2008, 2010 и 2012 гг. – 3.4, 2.9 и 2.5 соответственно), Алданском (2014 и 2015 гг. – 3.0 и 2.3 соответственно), Верхнезейско-Становом (2019 г. – 2.6), Турана-Буреинском (2014 г. – 2.5) и Сихотэ-Алинском (2014 г. – 2.5) мониторинговых регионах. При этом ни одно из них не достигает максимальных величин, характерных для $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$.

Анионы SO_4^{2-} и Cl^- также имеют общие источники поступления в атмосферу – свободные от снежного покрова побережья морей и засоленных озёр, но поскольку эмиссия первого в большей степени связана с пирогенными явлениями,

Таблица 4. Молярная концентрация азотсодержащих ионов в снеговых талых водах мониторинговых регионов

Шифр региона	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-
МР-01	0.0028 (2014 г.) – 0.0033 (2013 г.)* 0.0031 ± 0.0002**	0.0013 (2014 г.) – 0.0056 (2013 г.) 0,0039 ± 0.0015	0.0002 (2014 г.) – 0.0004 (2009 г.) 0.0003 ± 0.0001
МР-02	0.0028 (2007 г.) – 0.0188 (2011 г.) 0.0075 ± 0.0046	0.0012 (2013 г.) – 0.0046 (2009 г.) 0.0025 ± 0.0006	0.0002 (2019 г.) – 0.0025 (2013 г.) 0.0011 ± 0.0006
МР-03	0.0028 (2019 г.) – 0.0187 (2018 г.) 0.0086 ± 0.0044	0.0013 (2013 г.) – 0.0277 (2021 г.) 0.0072 ± 0.0060	0.0002 (2013 г.) – 0.0005 (2018 г.) 0.0003 ± 0.0001
МР-04	0.0032 (2012 г.) – 0.0104 (2019 г.) 0.0061 ± 0.0024	0.0013 (2012 г.) – 0.0065 (2008 г.) 0.0022 ± 0.0011	0.0002 (2012 г.) – 0.0016 (2009 г.) 0.0004 ± 0.0003
МР-05	Не определяли	0.0018 (2017 г.) – 0.097 (2018 г.) 0.0057 ± 0.0039	0.0002 (2018 г.)
МР-06	Не определяли	0.0021 (2017 г.) – 0.0112 (2014 г.) 0.0069 ± 0.0029	0.0002 (2018 г.) – 0.0009 (2014 г.) 0.0005 ± 0.0003
МР-07	0.0063 (2012 г.) – 0.0286 (2014 г.) 0.0174 ± 0.0074	0.0080 (2012 г.) – 0.0218 (2018 г.) 0.0150 ± 0.042	0.0002 (2018 г.) – 0.0007 (2014 г.) 0.0004 ± 0.0002
МР-08	0.0046 (2014 г.)	0.0245 (2014 г.)	0.0002 (2014 г.)
МР-09	0.0030 (2014 г.)	0.0116 (2014 г.)	0.0002 (2014 г.)
МР-10	0.0026 (2014 г.) – 0.0028 (2013 г.) 0.0027 ± 0.0001	0.0003 (2014 г.) – 0.0015 (2013 г.) 0.0009 ± 0.0006	0.0002 (2013 г.)
МР-11	0.0040 (2014 г.)	0.0063 (2014 г.)	0.0002 (2014 г.)

Примечание. *В числителе представлены минимальное и максимальное значения показателя; **в знаменателе – среднее арифметическое значение и его ошибка.

интенсивность которых отличается высокой динамикой по годам, величина $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ достаточно сильно варьирует (от 0.5 до 7.7). Наиболее высокими значениями этого показателя выделяются Кетско-Тымский (2014 г. – 4.0), Тигирецкий (2009 г. – 4.4), Абакано-Шапшальский (2012 и 2019 гг. – 2.6 и 5.4 соответственно), Верхнезейско-Становой (2019 г. – 7.7) и Сунтар-Хаятанский (2013 и 2014 гг. – 6.0 и 6.1 соответственно) мониторинговые регионы.

Азотсодержащие ионы. Во многих мониторинговых регионах молярная концентрация ионов NH_4^+ в снежном покрове варьировала от 0.003 (Сунтар-Хаятанский в 2014 г.) до 0.010 (Абакано-Шапшальский в 2019 г.) моль/л. Исключением оказались горные мониторинговые регионы (табл. 4): Тигирецкий, Иолго-Сумультинский и Верхнезейско-Становой, в которых её максимальная величина в отдельные годы достигала 0.019 (2011 г.), 0.019 (2018 г.) и 0.029 (2014 г.) моль/л соответственно.

Многолетняя динамика молярной концентрации ионов NO_3^- в снежном покрове мониторинговых

регионов варьирует от 0.0003 до 0.0277 моль/л. Наиболее высокие значения этого показателя обнаружены в горных мониторинговых районах: Иолго-Сумультинском в 2021 г. (0.0277 моль/л), Верхнезейско-Становом в 2017 г. (0.0218 моль/л) и Алданском в 2014 г. (0.0112 моль/л).

В отличие от остальных азотсодержащих ионов, для NO_2^- характерна очень низкая молярная концентрация в снежном покрове всех мониторинговых регионов, которая не превышала 0.0010 моль/л. Исключение составили образцы из Тигирецкого (с 2007 по 2014 г., кроме 2009 г.) и Абакано-Шапшальского (2009 и 2010 гг.) мониторинговых регионов, в которых этот показатель достигал максимальных значений – 0.0025 и 0.0016 моль/л соответственно. Таким образом, наиболее высокие молярные концентрации рассматриваемого аниона наблюдались до 2015 г.

Во всех мониторинговых регионах в снежном покрове среди азотсодержащих ионов преобладали NH_4^+ . Лишь в единичные годы их молярная концентрация становилась ниже, чем у NO_3^- .

ВЫВОДЫ

Снеговые талые воды, образующиеся при таянии снежного покрова в труднодоступных ландшафтах Северной Азии, относятся к ультрапресным, слабым, слабокислым и нейтральным. При этом более низкие значения pH и минерализации обнаружены в равнинных болотно-лесных биогеоценозах, а более высокие — в горных альпийских и субальпийских.

В результате частых масштабных пирогенных выбросов в ионном составе снежного покрова Северной Азии в течение всего периода наблюдений преобладали ионы HCO_3^- , даже вблизи морских побережий, где происходит интенсивное поступление в атмосферу анионов SO_4^{2-} и Cl^- . При этом до 2012 г. молярная концентрация всех исследуемых основных ионов отличалась более высокими значениями, которые в последующие годы снижались, особенно это заметно для гидрокарбонат-ионов и в меньшей степени — для хлорид-ионов.

Поскольку появление азотсодержащих ионов в снежном покрове связано с биохимическими процессами, интенсивность которых в период снегонакопления снижается, в снеговых талых водах Северной Азии их молярная концентрация также находится на низком уровне. Преобладающим ионом за всё время наблюдений был аммоний (особенно в высокогорных ландшафтах) и лишь в отдельные годы — нитрат-ион. Самой низкой молярной концентрацией отличались ионы NO_2^- , тем не менее в её многолетней динамике можно уловить более высокие значения в период наблюдения до 2015 г.

Благодарности. Работа выполнена в рамках бюджетного проекта № FUFZ-2021-0003 “Оценка эколого-биогеохимической обстановки в речных бассейнах Сибири в условиях изменения климата и антропогенного воздействия”.

Acknowledgements. The work was carried out within the framework of the budget project No. FUFZ-2021-0003 “Assessment of the ecological and biogeochemical situation in the river basins of Siberia in the conditions of climate change and anthropogenic impact”.

ЛИТЕРАТУРА

- Алекин О. А. Основы гидрохимии. Ленинград: Гидрометеиздат, 1953. 297 с.
- Алексеев В. Р. Снежный покров как индикатор кумулятивного загрязнения земель // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 127–140.
- Архипов С. А., Вдовин В. В., Мизеров Б. В., Николаев В. А. Западно-Сибирская равнина. М.: Наука, 1970. 279 с.
- Асфандиярова Л. Р., Панченко А. А., Юнусова Г. В., Ямлиханова Е. А. Экологический анализ содержания загрязняющих веществ в воздушном бассейне промышленного города (на примере оксидов азота в г. Стерлитамак Республики Башкортостан) // Вест. Тюменского гос. ун-та. 2013. № 2. С. 182–188.
- 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.
- Василенко В. Н., Назаров И. М., Фридман Ш. Д. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 181 с.
- Войтов И. В., Самусенко А. М., Высоченко А. В., Капилович Ж. А. Научно-методические основы организации и ведения Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь (основные положения технического проекта НС-МОС). Минск: БелНИЦ «Экология», 2000. 228 с.
- Воронова О. С., Зима А. Л., Кладов В. Л., Черепанова Е. В. Аномальные пожары на территории Сибири летом 2019 г. // Исследование Земли из космоса. 2020. № 1. С. 70–82.
- Глазовский Н. Ф., Злобина А. И., Учвалов В. П. Химический состав снежного покрова некоторых районов Верхнеокского бассейна // Региональный экологический мониторинг. М.: Наука, 1983. С. 67–86.
- Горюнова Н. В., Шевченко В. П., Новигатский А. Н. Геохимия снежного покрова в Арктике // Криогенные ресурсы полярных регионов. Нарьян-Мар, 2007. Т. 1. С. 204–206.
- Гусева Т. В., Молчанова Я. П., Заика Е. А., Виниченко В. Н., Аверочкин Е. М. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды: справочные материалы. М: Междунар. социально-экологический союз, 2000. 148 с.
- Еремин В. Н., Решетников М. В., Гребенюк Л. В., Соколов Е. С. Особенности структуры геохимического поля снежного покрова на территории города Саратова // Изв. Саратовского ун-та. Сер.: Науки о Земле. 2015. Т. 15. Вып. 2. С. 36–40.
- Иванова Г. А., Иванов В. А. Динамика лесных пожаров на территории лесных районов Средней Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2023. Т. 4. № 2. С. 43–48.
- Игнатенко О. В., Рябов А. В. Содержание и распределение сульфат-ионов в снежном покрове на территории г. Братска и Братского района // Тр. Братского гос. ун-та. Сер.: Естественные и инженерные науки. 2021. Т. 1. С. 238–243.
- Исаков А. А., Аникин П. П., Елохов А. С., Курбатов Г. А. О характеристиках дымов лесных и торфяных пожаров в Центральной России летом 2010 г. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 6. С. 478–482.
- Карамышева Д. В. Определение загрязнения почв сельскохозяйственного назначения по физико-химическим характеристикам снежного покрова // Междунар. студенческий науч. вестник. 2017. № 2. С. 109–114.

- Кононова Н. К. Влияние циркуляции атмосферы на формирование снежного покрова на северо-востоке Сибири // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 1. С. 38–53.
- Коришунуова Н. Н., Давлетишин С. Г., Аржанова Н. М. Изменчивость характеристик снежного покрова на территории России // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 80–100.
- Куценогий К. П., Валендик Э. Н., Буфетов Н. С., Барышев В. Б. Эмиссии лесного пожара в Центральной Сибири // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 87–91.
- Латышева И. В., Вологжина С. Ж., Лощенко К. А. Циркуляционные факторы возникновения лесных пожаров на территории Сибири и Дальнего Востока летом 2019 и 2021 гг. // Изв. Иркутского гос. ун-та. 2021. Т. 38. С. 54–70.
- Лосев К. С., Горшков В. Г., Кондратьев К. Я., Котляков В. М., Залиханов М. И., Данилов-Данильян В. И., Гаврилов И. Т., Голубев Г. Н., Ревякин В. С., Гракович В. Ф. Проблемы экологии России. М.: ВНИИ-ТИ, 1993. 348 с.
- Макаров В. Н. Геохимический мониторинг атмосферных осадков в Центральной Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 2007. 88 с.
- Максютова Е. В. Характеристика снежного покрова лесостепи Предбайкалья // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 1. С. 54–61.
- Максютова Е. В. Многолетние колебания толщины снежного покрова и максимальных снегозапасов на территории Предбайкалья // Лёд и Снег. 2013. Т. 53. № 2. С. 40–47.
- Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 1990. 15 с.
- Микушин В. В., Каплинский А. Е., Суторихин И. А., Пузанов А. В. Оценка аэрозольного загрязнения атмосферы заселенных пунктов Алтайского края и Республики Алтай по данным мониторинга снежного покрова // Экология урбанизированных территорий. 2006. № 2. С. 87–93.
- Морарь Н. Н. Роль компонентов атмосферы в формировании ядер конденсации // Метеорология и гидрология. 2003. № 9. С. 50–52.
- Морарь Н. Н., Чертищева О. А. Причины немонотонного тренда рН талых вод при оттаивании // Метеорология и гидрология. 2007. № 5. С. 81–87.
- Московченко Д. В., Арефьев С. П., Московченко М. Д., Юртаев А. А. Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири // Сибирский экологич. журнал. 2020. № 2. С. 243–255.
- Пономарев Е. И. Классификация пожаров в Сибири по данным Terra/MODIS на основе показателя их радиационной мощности // Исследование Земли из космоса. 2014. № 3. С. 56–64.
- Потапова С. А., Макаров В. Н. Оценка миграции хлор-иона из снега в грунты и озера в Центральной Якутии // Научный альманах. 2017. № 3–3 (29). С. 456–459.
- Пузанов А. В., Бабошкина С. В., Рождественская Т. А., Балыкин С. Н., Балыкин Д. Н., Салтыков А. В., Трошкова И. А., Двуреченская С. Я. Влияние биогеохимической обстановки водосборного бассейна озера Телецкое (Северо-Восточный Алтай) на содержание главных ионов и Fe в водах его притоков // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. № 2. С. 111–122.
- Савичев О. Г., Иванов А. О. Атмосферные выпадения в бассейне Средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек // Изв. РАН. Сер. геогр. 2010. № 1. С. 63–70.
- Ступникова Н. А., Салихова Т. В. Экологическое состояние снежного покрова в г. Петропавловске-Камчатском // Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промышленное и техническое использование. 2016. С. 54–58.
- Сухинин А. И. Мониторинг катастрофических пожаров в лесах Сибири // Решетневские чтения. 2010. Т. 1. С. 202–203.
- Танасиенко А. А., Чумбаев А. С. Особенности стока талых вод в Предсалаирье в чрезвычайно многоснежный гидрологический год // Сибирский экологич. журнал. 2008. Т. 15, № 6. С. 907–919.
- Тентюков М. П. Особенности формирования загрязнения снежного покрова: морозное конденсирование техногенных эмиссий (на примере районов нефтедобычи в Большеземельской тундре) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 4. С. 31–41.
- Трофимов С. С. Экология почв и почвенные ресурсы Кемеровской области. Новосибирск: Наука, 1975. 299 с.
- Трофимова И. Е., Балыбина А. С. Мониторинг температуры почвы и толщины снежного покрова на территории Иркутской области // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 1. С. 62–68.
- Фуряев В. В., Киреев Д. М., Фуряев И. В. Лесные пожары в ландшафтах Центральной Сибири // Леса России: политика, промышленность, наука, образование. 2018. Т. 2. С. 48–49.
- Чудаева В. А., Чудаев О. В., Юрченко С. Г. Особенности химического состава атмосферных осадков на юге Дальнего Востока // Водные ресурсы. 2008. Т. 35. № 1. С. 60–71.
- Bridges E. M. World geomorphology. 6. Asia. Cambridge. 1990. P. 123–165.
- Kaasik M., Rõõm R., Røyset O., Vadset M., Sõukand Ü., Tõugu K., Kaasik H. Elemental and base anions deposition in the snow cover of north-eastern Estonia // Water, Air, and Soil Pollution. 2000. № 121. P. 349–366.

Citation: Saltykov A.V., Balykin S.N., Balykin D.N., Gorbachev I.V. Ionic composition of snow cover on the territory of Siberia and the Far East. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (2): 262–272. [In Russian]. doi 10.31857/S2076673424020092

Ionic composition of snow cover on the territory of Siberia and the Far East

A. V. Saltykov^{1*}, S. N. Balykin¹, D. N. Balykin¹, I. V. Gorbachev²

¹*Institute for water and environmental problems SB RAS, Barnaul, Russia;*

²*Center for Operation of Space Ground Based Infrastructure NII PM, Moscow, Russia*

*e-mail: saltykovav@yandex.ru

Received November 15, 2023 / Revised March 22, 2024 / Accepted April 10, 2024

Long-term (from 2007 to 2022) observations of the dynamics of acidity, mineralization and ionic composition of snow cover in remote mountainous and lowland landscapes of Northern Asia were carried out. As a result, spatiotemporal changes in the molar concentration of basic (Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- and SO_4^{2-}) and nitrogen-containing (NH_4^+ , NO_3^- and NO_2^-) ions were analyzed. It turned out that during the entire observation period, bicarbonate ions prevailed in all monitoring regions, even near the sea coasts, where there is an intensive intake of sulfate and chloride ions into the atmosphere. Until 2012, the molar concentration of these three anions was characterized by higher values, which decreased 3–8 times in subsequent years, this is especially noticeable for bicarbonate ions and to a lesser extent for chloride ions. The molar concentration of nitrogen-containing ions in the snow cover of Northern Asia was at a low level (especially nitrite ions). Ammonium ions were predominant throughout the observation period (especially in mountainous landscapes) and only in some years – nitrate ions.

Keywords: ions, global background concentrations, snow cover, high mountains, swamps, taiga, Siberia, Russian Far East

REFERENCES

- Alekin O. A. *Osnovy gidrohimii. Fundamentals of hydrochemistry*. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1953: 297 p. [In Russian].
- Alekseev V. R. Snow cover as an indicator of cumulative land pollution. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2013, 53 (1): 127–140. [In Russian].
- Arhipov S. A., Vdovin V. V., Mizzerov B. V., Nikolaev V. A. *Zapadno-Sibirskaya ravnina. The West Siberian plain*. Moscow: Nauka, 1970: 279 p. [In Russian].
- Asfandiyarova L. R., Panchenko A. A., Yunusova G. V., Yamlihanova E. A. Environmental analysis of contaminants in the air basin of an industrial city (the case of nitrogen oxides in Sterlitamak, Bashkortostan). *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Tyumen State University Herald*. 2013. 4: 182–188. [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].
- Vasilenko V. N., Nazarov I. M., Fridman Sh. D. Monitoring zagryazneniya snezhnogo pokrova. Monitoring of snow cover pollution. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1985: 181 p. [In Russian].
- Vojtov I. V., Samusenko A. M., Vysochenko A. V., Kapilevich Zh. A. *Nauchno-metodicheskie osnovy organizatsii i vedeniya Nacional'noj sistemy monitoringa okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' (osnovnye polozheniya tekhnicheskogo proekta NSMOS)*. Scientific and methodological foundations of the organization and maintenance of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus (the main provisions of the technical project of the NSMOS). Minsk: BelRC "Ecology", 2000: 228 p. [In Russian].
- Voronova O. S., Zima A. L., Kladoy V. L., Cherepanova E. V. Abnormal fires in Siberia in the summer of 2019. *Issledovanie Zemli iz kosmosa. Exploring the Earth from space*. 2020, 1: 70–82. [In Russian].
- Glazovskij N. F., Zlobina A. I., Uchvalov V. P. The chemical composition of the snow cover of some areas of the Verkhneoksky basin. *Regional'nyj ekologicheskij monitoring. Regional environmental monitoring*. Moscow: Nauka, 1983: 67–86. [In Russian].
- Goryunova N. V., Shevchenko V. P., Novigatskij A. N. Geochemistry of snow cover in the Arctic. *Kriogennyye resursy polyarnyh regionov. Cryogenic resources of*

- polar regions. *Naryan-Mar*, 2007, 1: 204–206. [In Russian].
- Guseva T. V., Molchanova Ya. P., Zaika E. A., Vinichenko V. N., Averochkin E. M. *Gidrohimiicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchej sredy: spravochnye materialy*. Hydrochemical indicators of the state of the environment: reference materials. Moscow: International Socio-Ecological Union, 2000: 148 p. [In Russian].
- Eremin V. N., Reshetnikov M. V., Grebenyuk L. V., Sokolov E. S. The structure features of geochemical field of snow cover in the city of Saratov. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemle*. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*. 2015, 15 (2): 36–40. [In Russian].
- Ivanova G. A., Ivanov V. A. The dynamics of forest fires in the forest areas of Central Siberia. *Interexpo GEO-Sibir'*. *Interexpo GEO-Siberia*. 2023, 4 (2): 43–48. [In Russian].
- Ignatenko O. V., Ryabov A. V. The content and distribution of sulfate ions in the snow cover on the territory of Bratsk and Bratsk district. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki*. *Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2021, 1: 238–243. [In Russian].
- Isakov A. A., Anikin P. P., Elohov A. S., Kurbatov G. A. On the characteristics of smoke from forest and peat fires in Central Russia in the summer of 2010. *Optika atmosfery i okeana*. *Optics of the atmosphere and ocean*. 2011, 24 (6): 478–482. [In Russian].
- Karamysheva D. V. Determination of pollution of agricultural soil on physical and chemical characteristics of snow cover. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik*. *European Student Scientific Journal*. 2017, 2: 109–114. [In Russian].
- Kononova N. K. The influence of atmospheric circulation on the formation of snow cover in the northeast of Siberia. *Led i Sneg*. *Ice and Snow*. 2012, 52 (1): 38–53. [In Russian].
- Korshunova N. N., Davletshin S. G., Arzhanova N. M. Variability of snow cover characteristics over the territory of Russia. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021, 7 (1): 80–100. [In Russian].
- Kucenogij K. P., Valendik E. N., Bufetov N. S., Baryshev V. B. Forest fire emissions in Central Siberia. *Interexpo GEO-Sibir'*. *Interexpo GEO-Siberia*. 2012, 2 (3): 87–91. [In Russian].
- Latysheva I. V., Vologzhina S. Zh., Loshchenko K. A. Circulating factors of forest fires in Siberia and the Far East in the summer of 2019 and 2021. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Proc. of Irkutsk State University*. 2021, 38: 54–70. [In Russian].
- Losev K. S., Gorshkov V. G., Kondrat'ev K. Ya., Kotlyakov V. M., Zalihanov M. I., Danilov-Danil'yan V. I., Gavrilov I. T., Golubev G. N., Revyakin V. S., Grakovich V. F. *Problemy ekologii Rossii*. *Problems of Ecology of Russia*. M.: VINITI, 1993: 348 p. [In Russian].
- Makarov V. N. *Geohimicheskiy monitoring atmosferynyh osadkov v Central'noj Yakutii*. *Geochemical monitoring of atmospheric precipitation in Central Yakutia*. Yakutsk: Permafrost Institute SB RAS, 2007: 88 p. [In Russian].
- Maksyutova E. V. Characteristics of the snow cover of the forest-steppe in Cis-Baikal Area. *Led i Sneg*. *Ice and Snow*. 2012, 52 (1): 54–61. [In Russian].
- Maksyutova E. V. Long-term fluctuations of snow cover thickness and maximum snow storage in Cis-Baikal Area. *Led i Sneg*. *Ice and Snow*. 2013, 53 (2): 40–47. [In Russian].
- Metodicheskie rekomendacii po ocenke stepeni zagryazneniya atmosfernogo vozduha naselennykh punktov metallami po ih sodержaniyu v snezhnom pokrove i pochve. *Methodological recommendations for assessing the degree of atmospheric air pollution of settlements with metals based on their content in snow cover and soil*. Moscow: IMGRE, 1990: 15 p. [In Russian].
- Mikushin V. V., Kaplinskiy A. E., Sutorihin I. A., Puzanov A. V. Assessment of aerosol pollution of the atmosphere in the inhabited areas of the Altai Region and the Altai Republic using snow cover monitoring data. *Ekologiya urbanizirovannykh territorij*. *Ecology of Urban Areas*. 2006, 2: 87–93. [In Russian].
- Morar' N. N. The role of atmospheric components in the formation of condensation nuclei. *Meteorologiya i gidrologiya*. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2003, 9: 50–52. [in Russian]
- Morar' N. N., Chertishcheva O. A. The reasons for the non-monotonic pH trend of meltwater during settling. *Meteorologiya i gidrologiya*. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2007, 5: 81–87. [In Russian].
- Moskovchenko D. V., Aref'ev S. P., Moskovchenko M. D., Yurtaev A. A. Spatial and temporal analysis of wildfires in the forest tundra of Western Siberia. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. *Siberian Ecological Journ*. 2020, 2: 243–255. [In Russian].
- Ponomarev E. I. Classification of fires in Siberia according to Terra/MODIS data based on their radiation power index. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. *Exploring the Earth from space*. 2014, (3): 56–64. [In Russian].
- Potapova S. A., Makarov V. N. Assessment of the migration of chlorine ions from snow to soils and lakes in Central Yakutia. *Nauchnyj al'manah*. *Scientific Almanac*. 2017, 3–3 (29): 456–459. [In Russian].
- Puzanov A. V., Baboshkina S. V., Rozhdestvenskaya T. A., Balykin S. N., Balykin D. N., Saltykov A. V., Troshkova I. A., Dvurechenskaya S. Ya. Influence of the biogeochemical situation of the lake Teletskoe catchment (North-Eastern Altai) on the content of the major ions and the tributaries waters. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring*

- georesursov*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2022, 333 (2): 111–122. [In Russian].
- Savichev O. G., Ivanov A. O.* Atmospheric losses in the Middle Ob river basin and their influence on a hydrochemical runoff of the river. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya*. Regional Research of Russia. 2010, 1: 63–70. [In Russian].
- Stupnikova N. A., Salihova T. V.* The ecological state of snow cover in Petropavlovsk-Kamchatsky. *Prirodnye resursy, ih sovremennoe sostoyanie, ohrana, promyslovoe i tekhnicheskoe ispol'zovanie*. Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use. 2016, 54–58. [In Russian].
- Suhinin A. I.* Monitoring of catastrophic fires in the forests of Siberia. *Reshetnevskie chteniya*. Reshetnev readings. 2010, 1: 202–203. [In Russian].
- Tanasienko A. A., Chumbaev A. S.* Feature of snowmelt runoff waters in the cis-Salair region in an extremely snow-rich hydrological year. *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. Contemporary Problems of Ecology. 2008, 15 (6): 907–919. [In Russian].
- Tentyukov M. P.* Features of the snow cover pollution formation: frosty condensation of man-coused emission (by the example of petroleum production regions in Bol'shezemel'skaya tundra). *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2007, 11 (4): 31–41. [In Russian].
- Trofimov S. S.* Soil ecology and soil resources of the Kemerovo region. Novosibirsk: Nauka, 1975: 299 p. [In Russian].
- Trofimova I. E., Balybina A. S.* Monitoring of soil temperature and snow cover thickness in the Irkutsk region. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 52 (1): 62–68. [In Russian].
- Furyaev V. V., Kireev D. M., Furyaev I. V.* Forest fires in the landscapes of Central Siberia. *Lesa Rossii: politika, promyshlennost', nauka, obrazovanie*. Forests of Russia: politics, industry, science, education. 2018, 2: 48–49. [In Russian].
- Chudaeva V. A., Chudaev O. V., Yurchenko S. G.* Features of the chemical composition of atmospheric precipitation in the south of the Far East. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2008, 35 (1): 60–71. [In Russian].
- Bridges E. M.* World geomorphology. 6. Asia. Cambridge. 1990, 123–165.
- Kaasik M., Rõõm R., Røyset O., Vadset M., Sõukand Ü., Tõugu K., Kaasik H.* Elemental and base anions deposition in the snow cover of north-eastern Estonia. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2000, 121: 349–366.