

## ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В КРИОЛИТОЗОНЕ

УДК 550.46 (571.53)

DOI: 10.15372/KZ20210602

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ  
СНЕГОВОГО ПОКРОВА НА УДАЛЕНИИ ОТ ТОМСК-СЕВЕРСКОЙ  
ПРОМЫШЛЕННОЙ АГЛОМЕРАЦИИА.В. Захарченко<sup>1</sup>, А.А. Тигеев<sup>1</sup>, О.А. Пасько<sup>2</sup>, Л.Г. Колесниченко<sup>3</sup>, Д.В. Московченко<sup>1,4</sup><sup>1</sup> Институт проблем освоения Севера, ТюмНЦ СО РАН,  
625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия; avzakh@gmail.com, ttrruubbaa@mail.ru<sup>2</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт,  
195220, Санкт-Петербург, Гражданский пр., 14, Россия; pasko@agrophys.ru<sup>3</sup> Томский государственный университет, 634050, Томск, пр. Ленина, 36, Россия; klg77777@mail.ru<sup>4</sup> Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; moskovchenko1965@gmail.com

Депонирующая способность снежного покрова позволяет анализировать пространственно-временные геохимические закономерности, а также выявлять проблемные в экологическом отношении территории. В работе выявлены пространственные особенности геохимического регионального распределения содержания пылевых частиц, депонированных в снеговом покрове территорий, удаленных на разные расстояния от промышленного центра. Объектом исследования является снеговой покров Томского, Шегарского, Кожевниковского районов Томской области. Наблюдения проведены за период 1995–2000 гг. В фильтрате талого снега химико-аналитическими методами определены: рН, концентрации нитратного и аммиачного азота, фосфора, калия, кальция, магния, натрия, хлора, а в твердом остатке – микроэлементы (Cu, Zn, Cd, Pb, Co, Mn, Cr, Ni), с использованием атомно-абсорбционной спектрофотометрии. Средняя мощность снега равномерно распределена на изученной территории и изменяется по годам. Содержание в снеге пыли, аммония ( $\text{NH}_4^+$ ), фосфора ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Mg в лесу достоверно выше, чем на пашне. Вблизи промышленной зоны отмечены повышенные значения  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , щелочных и щелочно-земельных элементов. Содержание сидерофильных и литофильных элементов, меди и цинка возрастает вблизи промышленной зоны Томской агломерации. Свинец распределен по территории мозаично. В отдельно стоящих точках (пос. Баткат, Комаровские болота) также обнаружено повышенное содержание пыли и тяжелых металлов в снеговом покрове относительно фона.

**Ключевые слова:** твердые аэрозоли, снег, тяжелые металлы, пыль, микроэлементы.

SPATIAL DISTRIBUTION OF GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS  
OF SNOW COVER WITHIN AND OUTSIDE TOMSK-SEVERSK INDUSTRIAL AGGLOMERATIONA.V. Zakharchenko<sup>1</sup>, A.A. Tigeev<sup>1</sup>, O.A. Pasko<sup>2</sup>, L.G. Kolesnichenko<sup>3</sup>, D.V. Moskovchenko<sup>1,4</sup><sup>1</sup> Institute of the Problems of Northern Development, Tyumen Scientific Centre SB RAS,  
Malygina str. 86, Tyumen, 625026, Russia; avzakh@gmail.com, ttrruubbaa@mail.ru<sup>2</sup> Agrophysical Research Institute, Grazhdansky ave. 14, St. Petersburg, 195220, Russia; pasko@agrophys.ru<sup>3</sup> Tomsk State University, Lenina str. 36, Tomsk, 634050, Russia; klg77777@mail.ru<sup>4</sup> Tyumen State University, Semakova str. 10, Tyumen, 625003, Russia; moskovchenko1965@gmail.com

The ability of snow cover to accumulate airborne substances allows to analyze spatiotemporal geochemical patterns and to detect polluted areas. Spatial features of geochemical regional distribution of dust deposited in the snow cover in areas remote from industrial centers were identified. The snow cover of Tomsk, Shegarka and Kozhevnikovo districts of the Tomsk region was chosen to be the object of the research. The observations were carried out in the period from 1995 to 2000. The measurements of melt snow filtrate included: pH, concentrations of nitrate and ammonia nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, sodium, chlorine, while the solid residue was analyzed for heavy metal contents (Cu, Zn, Cd, Pb, Co, Mn, Cr, Ni) using atomic absorption spectrophotometry method. The average snow cover depth is evenly distributed in the study area and varies from year to year. Contents of dust, ammonia ( $\text{NH}_4^+$ ), phosphorus ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Mg in snow on the forest floor significantly differ (an upward bias) from areas of arable land. Ions  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , alkaline and alkaline-earth elements show an increasing trend (relative to the background values) near the industrial zone. The levels of siderophilic and lithophilic elements, copper and zinc increase near the industrial zone of Tomsk agglomeration. Lead shows a mosaic distribution throughout the territory. In disparate locations (Batkat village, Komarovo fens), dust and heavy metals contents in the snow cover were found to be higher relative to the background values.

**Key words:** solid aerosols, snow, heavy metals, dust, trace elements.

## ВВЕДЕНИЕ

Сезонная криосфера Западной Сибири является системообразующим фактором многих природных ландшафтов, что обусловлено, в том числе, горизонтальными потоками вещества естественной и антропогенной природы [Бордон, 1996]. Известно, что формирование состава снега Западно-Сибирской равнины происходит под влиянием зональных закономерностей, при этом поток макро- и микроэлементов в реки и озера во время весеннего паводка остается недооцененным [Ермолов и др., 2014; Shevchenko et al., 2017]. Вызванные общим потеплением климата Северного полушария [АМАР, 2011] общие тенденции динамики геосистем Арктики, заключающиеся в сокращении снегового и ледового покровов, увеличении времени стояния водоемов без льда, приводят к изменению потоков вещества.

В настоящее время выделяют три основных метода мониторинга геохимических свойств объекта [РД 52.04.186-89, 1991]: 1) импактный (подфакельный), 2) маршрутный, 3) вероятностно-статистический. Импактным методом проводят исследование объектов, очевидно воздействующих на химический состав снега [Черняева и др., 1978; Ермолов и др., 2002; Филимонок и др., 2013; Янченко и др., 2013; Онуцин и др., 2014; Таловская и др., 2014а,б; Крестьянникова и др., 2015]. В маршрутном методе за основу берут внешнюю закономерность, например природную зональность климата [Ермолов и др., 2014; Shevchenko et al., 2017]. Вероятностно-статистический подход применяют при отсутствии видимых границ импактного воздействия и априорных географических закономерностей, что делает его объективным при изучении природных экосистем. При этом территорию делят на условные квадраты, а выбор одного из них для наблюдения проводят случайным образом.

Актуальность работы обусловлена не столько выделением проблемных территорий, сколько выявлением закономерностей их перераспределения на значительном удалении от рассеянных источников [Akba et al., 2013; Xue et al., 2020] путем анализа состава снега, а также изучения пространственного распределения и эволюции атмосферных осадков, представляющих угрозу здоровью человека.

Цель работы состоит в выявлении пространственных особенностей геохимического регионального распределения пыли, депонированной в снеговом покрове территорий, при условии разной степени удаленности относительно промышленного центра.

В Томской области мониторинговые наблюдения геохимических характеристик снегового покрова, таких как микроэлементный и вещественный составы, начаты в 80-е гг. прошлого столетия

[Бояркина и др., 1993]. В 1990-е гг. многие регионы России испытывали загрязнения атмосферного воздуха оксидами серы ( $\text{SO}_x$ ) и азота ( $\text{NO}_x$ ), тяжелыми металлами [Walker et al., 2003]. Необходимо отметить исследования снегового покрова ученых Национального исследовательского Томского политехнического университета, проведенных под руководством Е.Г. Язиковой [Филимонок и др., 2013; Таловская и др., 2014а,б, 2018]. В основу данной работы положены материалы мониторинговых исследований снегового покрова, проведенных в 1990-х гг. в лаборатории почвоведения НИИ биологии и биофизики при ТГУ под руководством Л.А. Изерской.

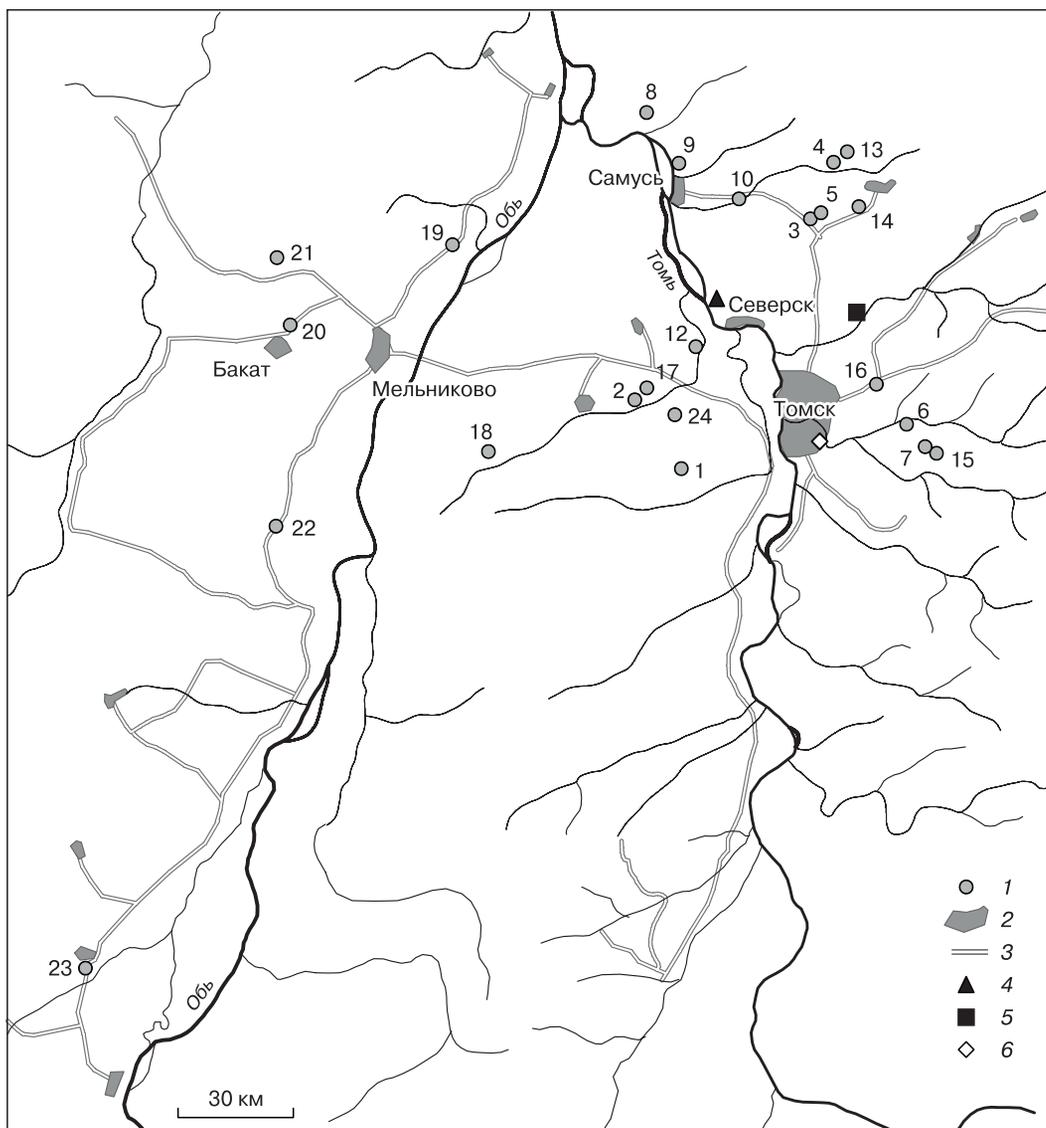
## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является снеговой покров фоновой территории Томской области (рис. 1). Точки наблюдения расположены вокруг Томск-Северской промышленной агломерации.

Изучены фоновые условия поступления вещества в снеговой покров согласно определению [РД 52.04.186-89, 1991] с целью выявить межрегиональный и трансграничный переносы твердых аэрозолей в зимний период. Ожидалось их поступление из Казахстана, а также их перенос через границу региона из Новосибирской области и Алтайского края.

Выбор точек наблюдения на территории Томской области основывался на вероятностно-статистическом подходе при организации региональной сети фоновых мониторингов. Работы были начаты в 1994 г. Отбор проб производился в течение 5 лет (1995–2000 гг.). Изучен состав снега на мониторинговых площадках, заложенных на различном расстоянии от источников загрязнения. Размер площадок мониторинга составляет 0.5 га [ГОСТ 17.4.3.01-83, 2004]. Выбор их местоположения проводился в зависимости от их доступности для подъезда автомобиля.

Интерес представляет оценка различий в поступлении пыли в снеговой покров на сельскохозяйственных угодьях и в лесах. Для оценки способности древесных растений задерживать пыль точки отбора проб снега в большинстве случаев располагали парно: в лесу и на близлежащем сельскохозяйственном поле [Глазовский, 2006]. Отбор проб снега производили в марте в течение недели. Для Томской области длительность периода залегания снега составляет 175–180 дней, а усредненное значение продолжительности снегового покрова  $T = 178$  сут [Филимонок и др., 2013]. В первый год наблюдения подготовлено 11 мониторинговых площадок (0.5 га), затем их число увеличено до 18, на следующий год – до 23, соответственно длительность наблюдений в период с 1995 по 2000 г. на площадках составила 3–6 лет.



**Рис. 1. Расположение точек отбора проб с указанием порядкового номера площадки и положение источников загрязнения атмосферного воздуха.**

1 – точки опробования; 2 – населенные пункты; 3 – дороги; 4 – Сибирский химический комбинат; 5 – Томский нефтехимический комбинат (ТНХК); 6 – ГРЭС-2.

Отбор проб и химический анализ снеговых вод выполнен по общепринятым методикам [Василенко и др., 1985; РД 52.04.186-89, 1991]. Отбор проб снега произведен стандартным снегомером на всю глубину слоя снега до подстилки, после чего нижние 5 см снега, содержащие примеси почвы и напочвенной подстилки, удаляли и определяли плотность снега. Для оценки содержания пыли составляли сборную пробу из 3–5 образцов в зависимости от мощности слоя снега.

Таяние снега производили в лабораторных условиях при комнатной температуре, измеряли

объем воды. Фильтрация осуществлялась с использованием вакуумного насоса сквозь фильтр “синяя лента”, затем фильтры высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С. В фильтрате определяли: рН [ПНД Ф 14.1.2:3:4.121-97, 1997], концентрации нитратов и  $\text{NH}_4^+$  [ПНД Ф 14.1.1-95, 1995], содержания фосфатов [ГОСТ 26204-91, 1992] в пересчете на  $\text{P}_2\text{O}_5$ , калия [РД 52.24.391-95, 1995] в пересчете на  $\text{K}_2\text{O}$ , кальция ( $\text{Ca}^{2+}$ ) и магния ( $\text{Mg}^{2+}$ ) [ГОСТ 26487-85, 1985], натрия [РД 52.24.391-95, 1995], хлоридов [ГОСТ 4245-72, 2010]. Пылевой осадок высушива-

ли при 105–110 °С, а затем его разлагали плавиковой кислотой. В растворе определяли валовые содержания никеля, кобальта, меди, цинка, марганца, хрома и кадмия с использованием атомно-адсорбционного спектрофотометра в восьми повторностях. Относительная погрешность атомно-абсорбционного анализа микроэлементов (%): Zn – 3.8, Cu – 3.5, Mn – 1.2, Co – 3.7, Pb – 4.2, Cd – 14.3.

Значения содержания микроэлементов пересчитаны на их содержание в литре снеговой воды (мкг/л), запас на единицу площади снега (мкг/м<sup>2</sup>) и поток веществ (мкг/(м<sup>2</sup>·сут)). Рассчитаны коэффициенты концентрации как отношение содержания микроэлементов (Кс) к фоновому значению (Кф):

$$K = \frac{K_c}{K_f}$$

и суммарный показатель загрязнения

$$Z_c = \sum K - (n - 1),$$

где  $K$  – коэффициент концентрации;  $n$  – число учитываемых элементов с  $K > 1$ .

Содержание пыли оценивалось по формуле

$$C = \frac{P_c}{V_w},$$

где  $C$  – концентрация пыли, г/л;  $P_c$  – вес пыли в талой воде, г;  $V_w$  – объем воды, л. Рассчитывалось общее поступление пыли ( $P$ ) на единицу площади в единицу времени. Площадь определялась по диаметру пробоотборника, умноженному на количество проб, отобранных в одной точке. Фоновыми значениями считались пробы на точках, значительно удаленных (30 км и более) от Томск-Северской агломерации. Исключение составили точки отбора проб 20 и 21.

Поток вещества пыли на снеговую поверхность определялся по формуле

$$P = \frac{P_c}{ST},$$

где  $P$  – поток вещества на единицу поверхности в единицу времени;  $P_c$  – масса пыли;  $S$  – суммарная площадь отбора проб;  $T$  – временной интервал между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова, сут.

Географические координаты точек наблюдения определены с помощью GPS. Для анализа распределения содержания микроэлементов в географическом пространстве использована геоинформационная система QGIS. С его помощью результаты кластерного анализа нанесены на карту, космические снимки. Измерено расстояние от каждой точки наблюдения до СХК и ГРЭС-2, которые рассматривались в качестве факторов воздействия.

Статистическая обработка данных выполнена с использованием программных продуктов Orange, Python. Для выявления групп точек по содержанию и запасам загрязняющих веществ, депонированных в снегу, использован многомерный кластерный анализ K-means. Аналогичные методы анализа применялись ранее [Shevchenko et al., 2017]. Для оценки влияния факторов поступления загрязняющих веществ в снег использован пакет программы Statistica for Windows.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам замеров на 24 площадках мониторинга, средняя мощность снегового покрова составляет (56.4 ± 2.7) см (табл. 1) и распределена равномерно по изученной территории (коэффициент вариации равен 25.9 %). По некоторым по-

Таблица 1. Статистические характеристики для показателей мощности снегового покрова и рН, химический состав снеготалых вод на площадках мониторинговых наблюдений

Характеристика	Мощность, см	рН	Содержание, мг/л								
			Пыль	N_NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	Ca	Mg	Na	Cl
Среднее	56.44	6.05	7.08	0.14	0.42	0.08	1.06	7.34	2.48	1.03	7.46
Доверительный интервал*	2.69	0.13	1.31	0.03	0.05	0.02	0.17	1.13	0.75	0.13	1.09
Медиана	54.95	6.10	4.90	0.05	0.35	0.06	1.00	5.41	1.22	1.00	7.00
Стандартное отклонение	14.63	0.73	7.14	0.18	0.23	0.09	0.90	6.18	4.07	0.62	5.15
Коэффициент вариации	25.93	12.07	100.86	132.23	56.16	106.70	84.75	84.15	164.00	60.45	69.03
Среднее для фоновых точек	55	6	4.1	0.12	0.38	0.06	1.02	6.75	2.01	1.09	7.17
Номер площадки	114	114	114	114	103	103	114	114	114	86	86

\* При уровне значимости  $p < 0.05$ .

казателям (мощность снега, рН) вариабельность средняя, по другим (содержание пыли,  $P_2O_5$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $NO_3^-$ ) – высокая ( $>100$ ).

Средние значения мощности снега в лесу больше, чем на пашне, что подтверждает тест Mann-Whitney при уровне значимости  $p < 0.05$ . Пылевая нагрузка в среднем составляет  $(8.5 \pm 3.6)$  мг/(м<sup>2</sup>·сут), что близко к фоновым значениям для Томской области (7 мг/(м<sup>2</sup>·сут)) [Таловская и др., 2014а,б].

Средняя плотность снега равна  $(0.19 \pm 0.01)$  г/см<sup>3</sup>, хотя обычно на пашне она больше, чем в лесу, но различия оказались недостоверными. Среднее содержание твердых нерастворимых частиц в талой снеговой воде составляет  $(6.8 \pm 1.2)$  мг/л. Повышенные концентрации пыли отмечены как на точках отбора проб вблизи агломерации (точки 5, 6, 10, 12, 16), так и на удалении от источников выброса пыли (точки 4, 21, 22) (см. рис. 1). Известно, что на фоновых участках в Арктике среднее содержание частиц в поверхностном слое снежного покрова составляет 2.74–2.91 мг/л [Шевченко и др., 2002, 2007]. Полученные авторами результаты показывают, что на территории Томской области содержание твердых примесей в снегу более чем в 2.5 раза превышает уровень, характерный для отдаленных арктических районов.

Отмечена значительная вариабельность этого показателя как в пространстве, так и во времени. Выделяется 1997 год, когда мощность снегового покрова была максимальной ( $78.2 \pm 4.7$  см), а содержание пыли – минимальным ( $0.40 \pm 0.13$  мг/л) (рис. 2).

Увеличение мощности слоя снега привело к снижению концентрации пыли за счет разбавления большим объемом снега. Следующий 1998 год выделяется увеличением потока пыли на поверхности снега. Сравнение двух выборок по тесту Mann-Whitney при  $p < 0.05$  в лесу и на сельскохозяйственном поле показало, что количество пыли в снеговой воде больше в лесу. Реакция снеговых вод рН изменяется от 5.6 до 6.6, среднее значение

составляет  $6.04 \pm 0.13$ , что указывает на подщелачивание в сравнении с данными других авторов: для снега 30-километровой зоны Сибирского химического комбината (СХК) рН 5.89 [Артамонова, 2011], на территории Ханты-Мансийского автономного округа (ХМАО) рН 5.4 [Московченко, Бабушкин, 2012].

Содержание  $NO_3^-$  в атмосфере отражает ее загрязнение при сгорании жидких форм топлива, распределение сернистых и азотистых соединений в снеговом покрове северной части России происходит неравномерно [Ветров, 2014]. Среднее содержание  $NO_3^-$  в Томской области составляет  $(1.4 \pm 0.03)$  мг/л, в точках отбора, удаленных от источников загрязнения, оно составляет  $(0.54 \pm 0.33)$  мг/л. Значения  $NO_3^-$  выше фоновых значений для ХМАО и равно 0.45 мг/л [Московченко, Бабушкин, 2012], а для месторождений Ямала характерен интервал 0.01–0.37 мг/л [Ермилов и др., 2002]. Содержание  $NH_4^+$  в снеговом покрове объектов исследования равно  $(0.41 \pm 0.04)$  мг/л, что согласуется с данными по Тюменской области, ХМАО. Фоновое содержание определено как  $(0.36 \pm 0.04)$  мг/л. Содержания  $NO_3^-$ ,  $NH_4^+$  повышены относительно фона вблизи промышленной зоны. Сравнение содержания  $NH_4^+$  в лесу и пашне выявило достоверные различия, в лесу оно выше.

Тест Mann-Whitney при  $p < 0.05$  подтвердил, что содержание фосфатов в снеготалой воде больше в лесу, чем на пашне. Среднее содержание  $P_2O_5$  в талой снеговой воде  $(0.08 \pm 0.2)$  мг/л существенно отличается от среднего значения для фоновых точек наблюдения  $(0.07 \pm 0.02)$  мг/л.

Среднее содержание калия ( $K_2O$ ) составляет  $(1.06 \pm 0.16)$  мг/л, натрия ( $Na^+$ ) равно  $(1.03 \pm 0.13)$  мг/л и незначительно изменяется по точкам наблюдения.

Содержание хлорид-иона наряду со щелочными металлами отражает загрязнение снега легкорастворимыми солями, по результатам исследования в среднем оно составило  $(7.46 \pm 1.1)$  мг/л. Концентрация  $Cl^-$  в точках наблюдения меняется

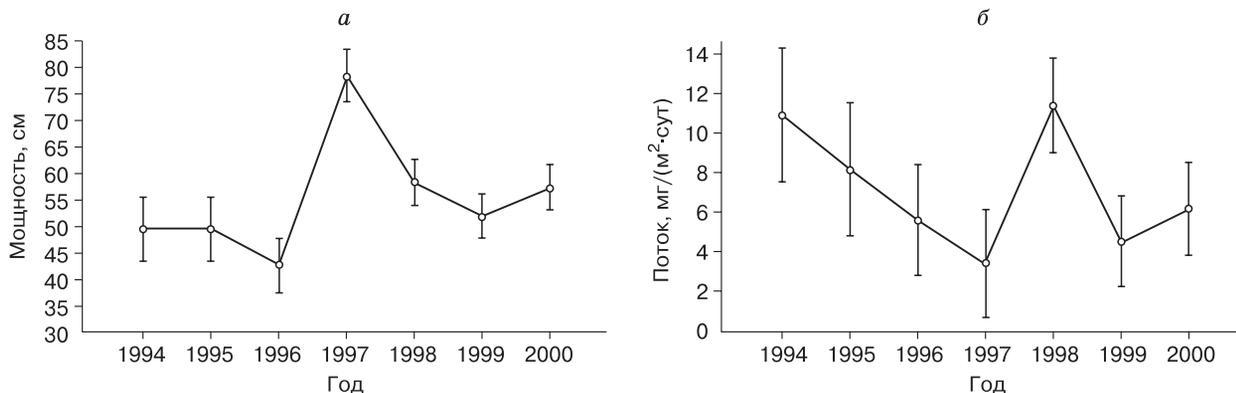


Рис. 2. Среднегодовые значения мощности снегового покрова (а) и потока пыли (б).

незначительно. Для ХМАО среднее содержание хлоридов в снегу существенно ниже (3.4 мг/л) [Московченко, Бабушкин, 2012], оно возрастает в направлении с запада на восток. Аномально высокое содержание хлорид-иона отмечено в 1997–1998 гг., позже оно резко уменьшилось до (1.3 ± 0.5) мг/л (см. рис. 2). Известно, что влияние морских акваторий на побережье распространяется на 200–250 км [Зверев, Рубейкин, 1973], поэтому можно исключить влияние морского источника на содержание хлоридов в исследованных пробах.

Среднее содержание кальция в снегу составило (7.3 ± 1.1) мг/л. Между Ca<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup> наблюдается логарифмическая зависимость:

$$Cl = 3.3 \ln(Ca) + 3.2 \quad (R^2 = 0.5 \text{ при } p < 0.05).$$

Наличие кальция в снеговом покрове связано с эрозионно-почвенным источником [Аэрозоли..., 2006], что указывает на континентальное происхождение хлорид-иона. Изучение поведения кальция на ледниках Восточного Тянь-Шаня выявило логарифмическую взаимосвязь между растворимостью кальция (DFP) и SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> [Wu et al., 2018]. Из ряда основных катионов минеральной пыли Ca<sup>2+</sup>

обладает наибольшей растворимостью с хлорид-ионом.

Содержание магния в снеговой воде составляет (2.5 ± 0.7) мг/л. Между содержаниями кальция и магния, магния и хлора коэффициент корреляции Спирмена менее 0.3, что говорит о несущественности связи между ними. Тест Mann-Whitney при p < 0.05 показал, что содержание Mg в лесу больше, чем на пашне.

Распределение содержания микроэлементов в снеговом покрове существенно различается между точками наблюдения (табл. 2).

Среднее содержание никеля в снегу равно (2.68 ± 0.33) мкг/л; минимальная концентрация никеля (1.38 мкг/л) зафиксирована на площадке 18 (с. Верх-Сеченово), менее интервала среднего при p < 0.05 отмечена в следующих точках: 19 (с. Трубочево), 7, 8 (с. Орловка), 1 (пос. Тимирязево). Выделяются точки с его повышенным содержанием: 4, 5, 12, 14, 16, 20, 21 при p < 0.05. При сопоставлении полученных результатов с данными фоновых территорий выявлено, что в Томск-Северской промышленной агломерации содержание Ni в снеготалых водах повышено. Так, в

Таблица 2. Среднее содержание (мкг/л) микроэлементов в твердом осадке снеговой воды

Точки*	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Zc
1	3.61	15.80	0.26	1.89	7.25	8.09	0.047	1.10	4.8
2	5.08	23.61	0.30	2.43	6.39	15.01	0.084	1.22	9.3
3	4.59	22.63	0.27	2.70	6.62	10.66	0.035	1.01	7.0
4	5.96	50.88	0.69	3.52	7.19	15.46	0.042	1.51	11.2
5	4.67	55.06	0.89	3.84	8.79	24.52	0.035	1.62	9.8
6	4.69	25.40	0.32	2.37	8.91	19.12	0.045	1.04	5.9
7	14.51	14.88	0.26	1.67	5.24	18.79	0.051	1.10	7.6
8	4.40	17.28	0.22	1.62	6.05	22.08	0.041	1.13	6.7
9	5.28	25.96	0.33	2.25	8.32	37.92	0.068	1.51	7.7
10	6.19	77.23	0.62	2.90	7.34	26.31	0.051	1.49	11.0
12	6.11	55.42	0.36	3.08	6.54	81.68	0.065	0.87	12.9
13	6.24	33.80	0.31	1.76	7.98	20.51	0.040	1.32	6.4
14	7.48	65.17	0.75	3.93	11.38	74.57	0.053	1.43	16.9
15	4.87	21.77	0.44	3.78	7.86	30.33	0.066	1.43	7.8
16	12.24	72.75	0.59	4.09	10.50	13.71	0.101	1.64	18.4
17	3.81	24.01	0.35	2.99	7.32	15.21	0.037	0.76	6.8
18	2.00	7.71	0.14	1.38	4.62	22.68	0.026	1.14	3.1
19	2.85	9.26	0.11	1.57	4.36	13.17	0.065	1.49	3.8
20	5.57	58.76	0.72	3.28	8.19	40.99	0.049	2.62	9.9
21	4.00	29.62	0.54	3.65	6.36	26.09	0.043	2.50	7.4
22	4.45	18.52	0.32	2.63	7.16	32.89	0.049	4.61	7.1
23	2.80	13.78	0.29	1.71	6.06	15.71	0.057	1.68	3.5
24	1.37	14.54	0.25	1.73	3.55	9.78	0.036	0.99	2.7
Среднее	5.60	34.16	0.42	2.68	7.30	26.7	0.052	1.42	8.5
Фоновое значение	3.64	18.42	0.25	1.97	6.27	15.70	0.04	1.17	5.07

\*Номера точек отбора проб см. на рис. 1.

Уральском промышленном регионе содержание никеля находится в диапазоне 0.2–0.8 мкг/л [Черняева и др., 1978], на месторождениях газа п-ова Ямал равно 0.7 мкг/л [Ермилов и др., 2002]. Среднее содержание цинка в снеготалых водах составляет  $(26.7 \pm 9.9)$  мкг/л. В населенных пунктах Тюменской области его содержание в снегу достигает 81 мкг/л. В ХМАО наиболее вероятное значение находится в интервале 10–27 мкг/л [Московченко, Бабушкин, 2012]. Максимальное значение для цинка выявлено в точке 12 (с. Коломино) – 81.7 мкг/л, чуть меньше в с. Наумовка – 74.6 мкг/л. В то же время отмечено высокое содержание (больше интервала среднего при  $p < 0.05$ ) в точках 9 (пос. Самусь) и 20 (пос. Баткат). Если пос. Самусь находится в зоне влияния СХК [Артамонова, 2011], то вблизи пос. Баткат промышленные предприятия отсутствуют. Загрязнение может происходить от факелов сжигания попутного газа, вблизи которых концентрация Zn в снегу достигает 52 мкг/л [Московченко, Бабушкин, 2012], однако пос. Баткат удален от нефтяных месторождений на сотни километров, а локальный перенос загрязняющих веществ от импактного воздействия находится пределах 5–15 км в зависимости от розы ветров [Lezhenin et al., 2016]. Грубодисперсные фракции пыли осаждаются в большинстве случаев (90 %) в радиусе 7 км от источника загрязнения, распространяясь в радиусе 40 км [Онуцин и др., 2014]. Выпадение снега способствует как сухому, так и мокрому вымыванию загрязнителей атмосферы [Таловская и др., 2014a].

В пос. Баткат расположена угольная котельная. При рассмотрении разных типов котельных отмечен рост коэффициента концентрации цинка наряду с другими элементами как признак выбросов при сжигании угля [Таловская и др., 2018; Talovskaya et al., 2018].

Содержание кобальта в снеговом покрове мало изучено [Аэрозоли..., 2006], на площадках наблюдения оно было выше среднего значения в точках северо-восточнее и восточнее Томской агломерации и в точке 20 (пос. Баткат). Для пылевых выбросов угольной котельной характерно увеличение содержания Co, высокие коэффициенты концентрации Na, Ca. Содержание металлов в снеговой пыли выше фона более чем в 2 раза.

Среднее содержание свинца в снеговом покрове составляет 7.6 мкг/л при фоновом значении 6.3 мкг/л. В точках 20, 22 отмечены концентрации свинца в снеговой пыли существенно выше фона. Точки 5 и 22 находятся в разных концах района исследования, но вблизи магистралей с интенсивным движением транспорта, что объясняет повышенное содержание Pb. Точки 20, 21 отстоят на 1.5–3.0 км от автотранспортных магистралей. Сухое вымывание свинца в снеговом покрове этих

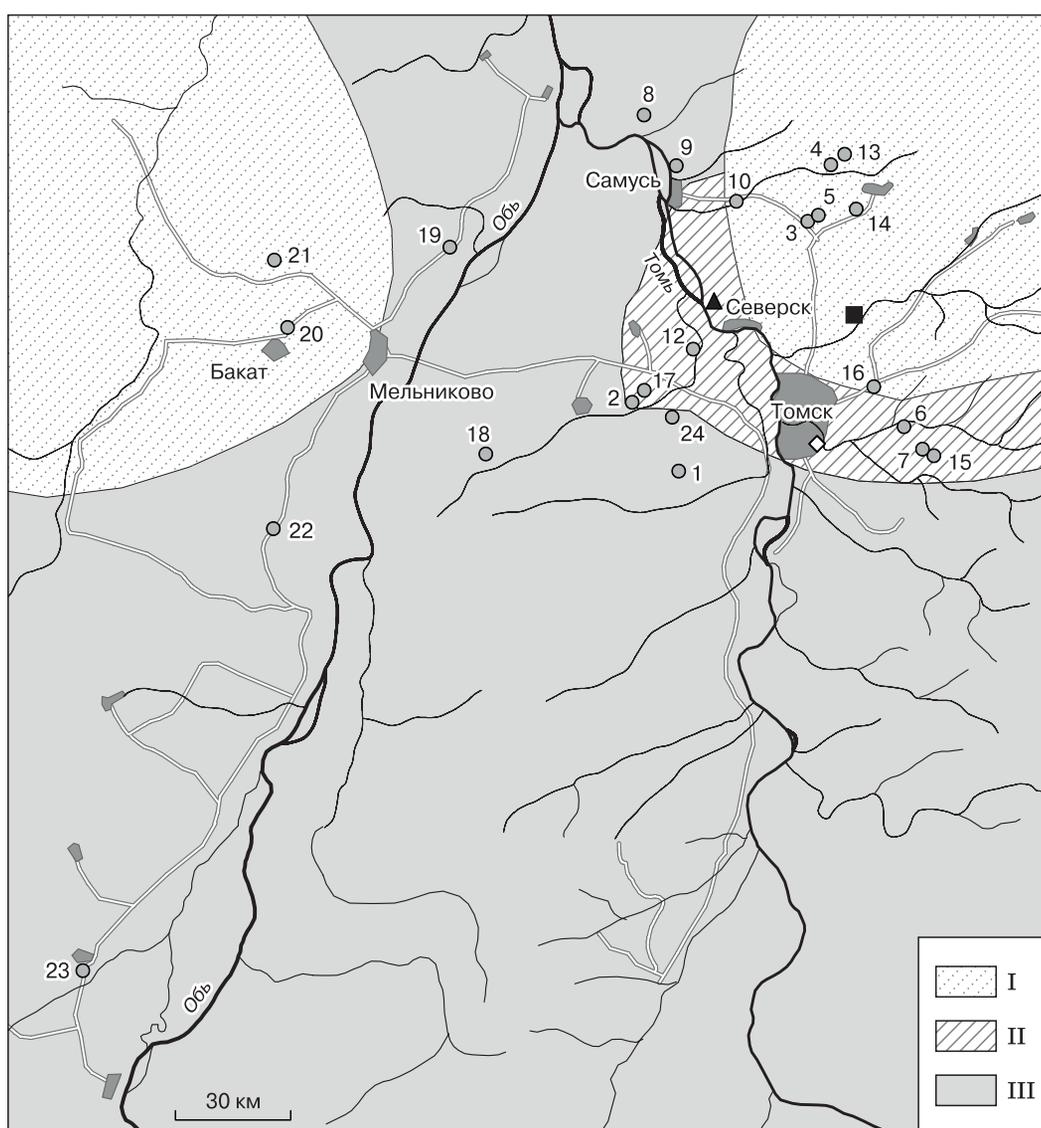
точек маловероятно. Изучение территории вокруг Норильского химического комбината показало, что выпадение Pb в снеговой покров имеет мозаичный характер [Онуцин и др., 2014]. Исследования поступления свинца в снеговом покрове г. Тюмени показали, что он концентрируется в твердой фазе, содержание варьирует в широких пределах – от 0 до 214 мкг/л [Крестьянникова и др., 2015]. Аномальные его концентрации локализованы.

В изученных точках наблюдения загрязнение медью охватывает площадки, расположенные вокруг Сибирского химического комбината, Томского нефтехимического комбината (ТНХК) (5, 6, 9, 10, 13–16), где  $K_c > 1$ . Средняя концентрация меди составляет  $(7.3 \pm 0.8)$  мкг/л. Высокое значение  $K_c$  наблюдается в точке 20 (пос. Баткат). В углях, используемых как топливо, вряд ли можно ожидать высокого содержания меди. Отмечается, что угли Сибири обогащены литофильными химическими элементами и сидерофилами (Cr, Ni, Co) и обеднены элементами-халькофилами (Cu, Pb, Zn, Cd и др.) [Арбузов, 2007]. Следовательно, Cu поступает в снег пос. Баткат из других источников. Марганец широко используется в химической промышленности, поэтому увеличения его количества относительно фона следует ожидать вблизи СХК и ТНХК. Среднее значение равно  $(34.2 \pm 7.3)$  мкг/л, фоновое – 18.4 мкг/л. В точках наблюдения (4, 5, 9, 10, 13–16), окружающих химические комбинаты, содержание в 2–3 раза превышает фоновые значения. В точках 20, 21 значение  $K_c$  высокое – 3.6 и 1.8, что также не может быть связано с химическим составом твердого топлива котельной. Точки загрязнения территориально тяготеют к ТНХК и г. Томску. Аномалии содержания хрома в снеговом покрове связывают с литейным производством [Сергеева, Куимова, 2011]. Загрязнение городского снега хромом в г. Благовещенске авторы связывают с трансграничным переносом из Китая, где используют уголь для работы ТЭЦ. В Томске литейное производство оставалось на Инструментальном заводе, но за пределы города оно не распространялось. Источником хрома может быть ГРЭС-2, на которой в 1990-е гг. отопление частично производилось каменным углем. В снеговом покрове среднее содержание кадмия равно  $(1.0 \pm 0.2)$  мкг/л. Аномально высокие содержания кадмия в снеговом покрове связывают с промышленной и селитебно-транспортной зонами [Сергеева, Куимова, 2011]. Максимально высокое значение  $K_c$  (1.3–2.0) отмечено в точках 16, 2, 9, минимальное  $K_c$  (1.1–1.3) – в точках 15, 12, 19, 23. Все точки расположены вблизи автомагистралей, а наиболее высокие значения характерны для точек, расположенных около промышленной зоны.

Среднее значение суммарного показателя загрязнения  $Z_c$  равно  $8.5 \pm 1.3$ , оно изменяется в широких пределах с коэффициентом вариации 73 %. Считается, что при значениях  $Z_c < 32$  уровень загрязнения является низким, неопасным [Касимов и др., 2012].

Для классификации точек наблюдения использован кластерный анализ K-means. Для упрощения задана разбивка на три кластера в соответствии со сложившейся на тот момент ситуацией с распределением микроэлементов на территории области. Усредненные по годам евклидовы расстояния между многомерными центрами кластеров нанесены на карту с использованием QGIS

(рис. 3). Результаты классификации для удобства показаны черно-белой штриховкой (усл. знаки I–III на рис. 3). Точки, которые группируются на северо-востоке и юго-востоке от СХК и вблизи ТНХК (точки 10, 3, 5, 14, 4, 16), соответствуют зоне I. Близким химическим составом характеризуются точки, значительно удаленные на 70 км от СХК: точки 20 и 21. Похожая ситуация отмечается в г. Братске, где источником загрязнения тяжелыми металлами является Братский алюминиевый завод (БрАЗ) [Янченко и др., 2013]. В точке, расположенной на 29 км от источника, наблюдался высокий уровень концентрации веществ, даже выше, чем на расстоянии 3 км от предприятия. Пред-



**Рис. 3. Распределение среднегодовых значений результатов многомерного кластерного анализа запасов микроэлементов (Ni, Co, Cu, Mn, Zn, Pb, Cr, Cd) на территории Томской области.**

Сходные по химическому составу зоны: I – промышленная зона, II – промышленно-селитебная зона, III – относительно чистые территории. Усл. обозн. см. на рис. 1.

полагается, что загрязнение обусловлено не предприятием БрАЗ, а котельной. По нашему мнению, перенос тяжелых металлов на такое расстояние от предприятия возможен, так как состав и концентрации химических элементов (спектр) на расстоянии 29 км схож с тем, что наблюдается вблизи БрАЗ.

Зона II объединяет переходную группу (точки 2, 3, 6, 7, 12, 15), тяготеющую к ГРЭС-2 и загрязнению веществами, специфичными для города. В зоне III выделены точки, сравнительно чистые по компонентному составу (точки 1, 8, 9, 13, 18, 22–24), что почти совпадает с точками ниже интервала среднего значения Zc.

### ВЫВОДЫ

1. Средняя мощность снегового покрова распределена равномерно на изученной территории, но характеризуется изменчивостью по годам наблюдения. Среднее содержание пыли составляет  $(6.8 \pm 1.2)$  мг/л, пылевая нагрузка равна  $(8.5 \pm 3.6)$  мг/(м<sup>2</sup>·сут).

2. По некоторым показателям (мощность снега, рН) вариабельность средняя, тогда как по другим (например, содержание пыли, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Mg, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) она высокая (>100).

3. Сравнение снегового покрова в лесу и на пашне выявило, что в лесу мощность слоя снега, содержания пыли, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Mg достоверно отличаются от пашни в сторону увеличения.

4. Содержание микроэлементов возрастает вблизи промышленной зоны Томской агломерации. Свинец распределен по территории мозаично и приурочен к точкам вблизи автомобильных магистралей, а кадмий имеет высокий коэффициент концентрации как на фоновых площадках, так и в промышленной зоне.

5. Многомерный кластерный анализ разделил точки наблюдения на три группы: промышленная, промышленно-сельскохозяйственная зоны и относительно чистые территории.

6. Выявлены отдельно отстоящие точки (пос. Баткат и Комаровские болота), удаленные более чем на 70 км от СХК и ТНХК. Они имеют повышенное содержание в снеговом покрове пыли (в 1.5–2 раза относительно фона) и тяжелых металлов, по составу аналогичных тому, что наблюдается к северо-востоку от Томск-Северской агломерации.

7. По величине суммарного показателя загрязнения все площадки наблюдения имеют среднее значение Zc < 32, что указывает на низкий уровень загрязнения снегового покрова тяжелыми металлами. Таким образом, выпадение загрязняющих веществ в снеговой покров имеет очаговый характер как в пределах 30-километровой зоны непосредственного влияния промышленных объ-

ектов, так и на значительном удалении от них (более 70 км).

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-50062/19) и финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (соглашение № 075-15-2020-805 от 02.10.2020 г.).

### Литература

- Арбузов С.И.** Металлоносность углей Сибири // Изв. Том. политехн. ун-та, 2007, № 1, с. 77–83.
- Артамонова С.Ю.** Оценка аэрозольного техногенного загрязнения района г. Северска с помощью геохимических и ГИС-методов // ГЕОСИБИРЬ. Новосибирск, Изд-во Сиб. гос. ун-та геосистем и технологий, 2011, т. 4, с. 2542–2558.
- Аэрозоли Сибири** / Под ред. К.П. Куценого. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2006, 548 с.
- Бордон С.В.** Формирование геохимических аномалий в снежном покрове урбанизированных территорий // Лита-сфера, 1996, № 5, с. 172–177.
- Бояркина А.П.** Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А.П. Бояркина, В.В. Байковский, Н.В. Васильев и др. Томск, Изд-во Том. ун-та, 1993, 157 с.
- Василенко В.Н.** Мониторинг загрязнения снежного покрова / В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. Л., Гидрометеиздат, 1985, 185 с.
- Ветров В.А., Кузовкин В.В., Манзон Д.А.** Кислотность атмосферных осадков и атмосферные выпадения серы и азота в Арктической зоне Российской Федерации по данным мониторинга химического состава снежного покрова // Арктика: экология и экономика, 2014, № 3 (15), с. 46–51.
- Глазовский Н.Ф.** Избр. тр. в 2 т. Т. 1. Геохимические потоки в биосфере. М., Т-во науч. изданий КМК, 2006, 535 с.
- ГОСТ 4245-72.** Вода питьевая. Методы определения содержания хлоридов. М., Стандартинформ, 2010, 6 с.
- ГОСТ 17.4.3.01-83.** Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб. М., Изд-во стандартов, 2004, 4 с.
- ГОСТ 26487-85.** Почвы. Определение обменного кальция и обменного (подвижного) магния методами ЦИНАО. М., Изд-во стандартов, 1985, 14 с.
- ГОСТ 26204-91.** Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Чирикова в модификации ЦИНАО. М., Изд-во стандартов, 1992, 8 с.
- Ермилов О.М.** Воздействие объектов газовой промышленности на северные экосистемы и экологическая стабильность геотехнических комплексов в криолитозоне / О.М. Ермилов, Г.И. Грива, В.И. Москвин. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2002, 147 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, № 9 (27), с. 790–800.
- Зверев В.П., Рубейкин В.З.** Роль атмосферных осадков в круговороте химических элементов между атмосферой, литосферой и гидросферой // Изв. вузов. Геология и разведка, 1973, № 12, с. 54–60.
- Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В.** Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География, 2012, № 4, с. 14–24.
- Крестьянникова Е.В., Козлова В.В., Ларина Н.С., Ларин С.И.** Химико-экологическая оценка загрязнения свин-

цом атмосферы города Тюмени // Изв. Самар. науч. центра РАН, 2015, т. 17, № 5 (2), с. 679–684.

**Московченко Д.В., Бабушкин А.Г.** Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа // Криосфера Земли, 2012, т. XVI, № 1, с. 71–81.

**Онучин А.А., Буренина Т.А., Зубарева О.Н. и др.** Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района // Сиб. экол. журн., 2014, № 6, с. 1025–1037.

**ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97.** Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений рН в водах потенциометрическим методом. М., Мин-во охраны окружающей среды и природ. ресурсов РФ, 1997, 11 с.

**ПНД Ф 14.1:2.1-95.** Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. М., Мин-во охраны окружающей среды и природ. ресурсов РФ, 1995, 18 с.

**РД 52.24.391-95.** Методические указания. Методика выполнения измерений массовой концентрации натрия и калия в поверхностных водах суши пламенно-фотометрическим методом / Росгидромет. Гидрохим. ин-т. Ростов н/Д, 1995, 9 с.

**РД 52.04.186-89.** Руководство по контролю загрязнения атмосферы. М., Госкомгидромет СССР, 1991, 450 с.

**Сергеева А.Г., Куимова Н.Г.** Снежный покров как индикатор состояния атмосферного воздуха в системе санитарно-экологического мониторинга // Бюл. патологии и физиологии, 2011, № 40, с. 100–104.

**Таловская А.В., Филимонок Е.А., Язиков Е.Г.** Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосферы и океана, 2014а, № 6, с. 491–495.

**Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимонок Е.А.** Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снегового покрова // Геоэкология. Инж. геология. Гидрогеология. Геокриология, 2014б, № 5, с. 408–417.

**Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимонок Е.А.** Микроэлементный состав твердого осадка снега в окрестностях котельных, использующих различные виды топлива (на примере Томской области) // Материалы II Байкал. Междунар. науч.-практ. конф.: Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: технология, климат и экология (Иркутск, 25–30 июня 2018 г.). Иркутск, Изд-во ИРНТУ, 2018, с. 55–59.

**Филимонок Е.А., Таловская А.В., Язиков Е.Г. и др.** Минерально-вещественный состав пылевых атмосферных выпадений в зонах воздействия промышленных предприятий г. Томска // Минералогия техногенеза, 2013, № 14, с. 191–202.

**Черняева Л.Е.** Химический состав атмосферных выпадений (Урал и Уральский район) / Л.Е. Черняева, А.М. Черняев, А.К. Могиленских. Л., Гидрометеоздат, 1978, 178 с.

**Шевченко В.П., Лисицын А.П., Полякова Е.И. и др.** Распределение и состав осадочного материала в снежном покрове дрейфующих льдов Арктики (пролив Фрама) // Докл. РАН, 2002, т. 383, № 3, с. 385–389.

**Шевченко В.П., Лисицын А.П., Штайн Р. и др.** Распределение и состав нерастворимых частиц в снеге Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики, 2007, № 75, с. 106–118.

**Янченко Н.И., Баранов А.Н., Чебыкин Е.П. и др.** Особенности и факторы, влияющие на распределение металлов,

редкоземельных элементов, углерода и фтора в фильтрате и в твердом осадке снежного покрова города Братска // Вестн. ИрГТУ, 2013, № 10 (81), с. 141–148.

**Akba O., Kilinc E., Aydin I. et al.** Major and trace element contamination of short-term snow cover during and after a dust storm and analysis by ICP-OES // Atom. Spectros, 2013, No. 34, p. 48–52.

**AMAP,** 2011. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. Oslo, Norway, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011, 538 p.

**Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F.** Monitoring of aerosol pollution of snow cover with ground based observation data and satellite information // J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol., 2016, vol. 9 (7), p. 950–959, DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-7-950-959.

**Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N. et al.** Impact of snow deposition on major and trace element concentrations // Hydrol. Earth Syst. Sci., 2017, vol. 21, p. 5725–5746.

**Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. et al.** Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia) // Environ. Technology (U.K.), 2018, vol. 39 (18), p. 2288–2303, DOI: 10.1080/09593330.2017.1354075.

**Walker T.R., Young S.D., Crittenden P.D., Zhang H.** Anthropogenic metal enrichment of snow and soil in north-eastern // Environ. Pollution, 2003, vol. 121, p. 11–21.

**Wu G., Li P., Zhang X., Zhang Ch.** Using a geochemical method of dissolved and insoluble fractions to characterize surface snow melting and major element elution // J. Glaciol., 2018, vol. 64 (248), p. 1003–1013, DOI: 10.1017/jog.2018.87.

**Xue H., Chen W., Li M. et al.** Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018 // Chemosphere, 2020, vol. 251, p. 1–7.

## References

Arbuzov S.I. Metal content of Siberia coals. Izvestia Tomsk. politekh. un-ta [Bulletin of Tomsk Polytechnic University], 2007, No. 1, p. 77–83 (in Russian).

Artamonova S.Yu. Assessment of technogenic aerosol pollution of Seversk area using geochemical and GIS methods. GEOSIBIR, Novosibirsk, Izd-vo Sib. gos. un-ta geosistem i tekhnologii, 2011, vol. 4, p. 2542–2558 (in Russian).

Aerозоли Sibiri [Aerosols of Siberia]. K.P. Kutsenogii (Ed.). Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2006, 548 p. (in Russian).

Bordon S.V. Formation of geochemical anomalies in the snow cover of urbanized territories. Litasfera [Lithosphere], 1996, No. 5, p. 172–177 (in Russian).

Boyarkina A.P., Baikovskii V.V., Vasil'ev N.V. et al. Aerозоли v prirodnyh planshetah Sibiri [Aerosols in Siberian Natural Trays]. Tomsk. Tomsk University Press, 1993, 157 p. (in Russian).

Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. Monitoring zagrязneniya snejnogo pokrova [Monitoring of Snow Cover Pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 185 p. (in Russian).

Vetrov V.A., Kuzovkin V.V., Manzon D.A. Acidity of atmospheric precipitation and atmospheric deposition of sulfur and nitrogen in the Arctic Zone of the Russian Federation according to the monitoring of the snow cover chemical composition. Arktika: ekologiya i ekonomika [Arctic: Ecology and Economy], 2014, No. 3 (15), p. 46–51 (in Russian).

- Glazovskii N.F. Izbrannye trudy v dvuh tomah. T. 1. Geohimicheskie potoki v biosfere [Selected works in two volumes. Vol. 1. Geochemical Flows in the Biosphere]. Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdanij KMK, 2006, 535 p. (in Russian).
- GOST 4245-72. Voda pitevaya. Metodi opredeleniya sodernianiya hloridov [Drinking water. Methods for determination of chloride content]. Moscow, Standartinform, 2010, 6 p. (in Russian).
- GOST 17.4.3.01-83. Ohrana prirodi. Pochvi. Obschie trebovaniya k otboru prob [Nature protection. Soil. General requirements for sampling]. Moscow, Izd-vo standartov, 2004, 4 p. (in Russian).
- GOST 26487-85. Opredelenie obmennogo kalciya i obmennogo (podvizhnogo) magniya metodami CINA0 [Soil. Determination of exchangeable calcium and exchangeable (mobile) magnesium by CINA0 methods]. Moscow, Izd-vo standartov, 1985, 14 p. (in Russian).
- GOST 26204-91. Pochvi. Opredelenie podvizhnykh soedinenii fosfora i kaliya po metodu Chirikova v modifikatsii CINA0 [Soil. Determination of mobile phosphorus and potassium compounds by Chiricov method modified by CINA0]. Moscow, Izd-vo standartov, 1992, 8 p. (in Russian).
- Ermilov O.M., Griva G.I., Moskvina V.I. Vozdejstvie ob'ektov gazovoj promyshlennosti na severnye ekosistemy i ekologicheskaya stabil'nost' geotekhnicheskikh kompleksov v kriolitozone [Effect of Gas Industry Objects on Northern Ecosystems and Ecological Stability of Geotechnical Complexes in Permafrost]. Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2002, 147 p. (in Russian).
- Ermolov Yu.V., Mahatkov I.D., Khudyaev S.A. Background concentrations of chemical elements in snow cover of the central regions of Western Siberia. Optika atmosfery i okeana [Optics of the Atmosphere and Ocean], 2014, No. 9 (27), p. 790–800 (in Russian).
- Zverev V.P., Rubeikin V.Z. The role of atmospheric precipitations in circulation of chemical elements between the atmosphere, lithosphere and hydrosphere. Izv. vuzov. Geologiya i razvedka [News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration], 1973, No. 12, p. 54–60 (in Russian).
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Tverskaya E.V. Geochemistry of snow cover in Eastern district of Moscow. Vestnik Mosk. Un-ta [Bulletin of the Moscow State University. Ser. 5. Geography], 2012, No. 4, p. 14–24 (in Russian).
- Krest'yannikova E.V., Kozlova V.V., Larina N.S., Larin S.I. Chemical and environmental assessment of lead pollution in the atmosphere of the city of Tyumen. Izv. Samar. nauch. tsentra RAN [Izvestiya Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2015, vol. 17, No. 5 (2), p. 679–684 (in Russian).
- Moskovchenko D.V., Babushkin A.G. Features of formation of the chemical composition of snow cover on the territory of Khanty-Mansi Autonomous Okrug. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2012, vol. XVI, No. 1, p. 71–81 (in Russian).
- Onuchin A.A., Burenina T.A., Zubareva O.N., Trefilova O.V., Danilova I.V. Pollution of snow cover in the impact zone of enterprises in Norilsk Industrial Area. Sibirskij ekologicheskij zhurnal [Siberian Ecological Journal], 2014, No. 6, p. 1025–1037 (in Russian).
- PND F 14.1-2-3-4.121-97. Kolichestvennii himicheskii analiz vod. Metodika vipolneniya izmerenii pH v vodah potenciometricheskim metodom [Quantitative chemical analysis of waters. Method for measuring pH in waters with the potentiometric method]. Moscow, Ministerstvo ohrani okrujayuschei sredi i prirodnih resursov RF, 1997, 11 p. (in Russian).
- PND F 14.1-2.1-95. Metodika vipolneniya izmerenii massovoi koncentracii ionov ammoniya v prirodnih i stochnih vodah fotometricheskim metodom s reaktivom Nesslera [Method for measuring the mass concentration of ammonium ions in drinking, surface (including sea) and waste waters by the photometric method with Nessler reagent]. Moscow, Ministerstvo ohrani okrujayuschei sredi i prirodnih resursov RF, 1995, 18 p. (in Russian).
- RD 52.24.391-95. Metodicheskie ukazaniya. Metodika vipolneniya izmerenii massovoi koncentracii natriya i kaliya v poverhnostnykh vodah sushi plamenno-fotometricheskim metodom [Methodological guidelines. Methods for measuring the mass concentration of sodium and potassium in the surface land waters using a flame-photometric method]. Rostov na Donu, 1995, 9 p. (in Russian).
- RD 52.04.186-89. Rukovodstvo po kontrolyu zagryazneniya atmosfery [Guidelines for air pollution control]. Moscow, Goskomgidromet SSSR, 1991, 450 p. (in Russian).
- Sergeeva A.G., Kuimova N.G. Snow cover as an indicator of the state of atmospheric air in the system of sanitation and environmental monitoring. Byulleten' patologii i fiziologii [Bulletin of Pathology and Physiology], 2011, No. 40, p. 100–104 (in Russian).
- Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics in the elemental composition of snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration. Optika atmosfery i okeana [Optics of the Atmosphere and Ocean], 2014a, No. 6, p. 491–495 (in Russian).
- Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. Assessment of the atmosphere pollution in urbanized areas of Tomsk region by the results of snow cover study. Geokologiya. Inzhenernaya Geologiya. Hidrogeologiya. Geokriologiya [Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology], 2014b, No. 5, p. 408–417 (in Russian).
- Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A. Element composition of solid airborne particles deposited in the snow in the vicinity of boilers using different types of fuel (on the example of Tomsk region). In: Materials of the II Baikal International Scientific and Practical Conference: Snow cover, precipitation, aerosols: technology, climate and ecology (Irkutsk, June 25–30, 2018). Irkutsk, IRNITU, 2018, p. 55–59 (in Russian).
- Filimonenko E.A., Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Chumak Yu.V., Ilenok S. Mineral composition of precipitated airborne particles in impact zones of Tomsk industrial enterprises. Mineralogiya tekhnogeneza [Mineralogy of Technogenesis], 2013, No. 14, p. 191–202 (in Russian).
- Chernyaeva L.E., Chernyaev A.M., Mogilenskih A.K. Himicheskij sostav atmosferynykh vypadenij (Ural i Ural'skij rajon) [The Chemical Composition of Atmospheric Precipitations (Ural Mountains and Cis-Ural Region)]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1978, 178 p. (in Russian).
- Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Polyakova E.I., Detlef D., Serova V.V., Stein R. Distribution and composition of insoluble particles in the snow cover of Arctic drift ice (Fram Strait). Doklady Akademii Nauk [Reports of the Academy of Sciences], 2002, vol. 383, No. 3, p. 385–389 (in Russian).
- Shevchenko V.P., Lisitsyn A.P., Stein R., Goryunova N.I., Kuvichkin A.A., Kravchishina M.D., Crews M., Novigatsky A.N., Sokolov V.T., Filippov A.S., Haas H. Distribution and composition of insoluble particles in Arctic snow. Problemy Arktiki i Antarktiki [Problems of the Arctic and Antarctic], 2007, No. 75, p. 106–118 (in Russian).
- Yanchenko N.I., Baranov A.N., Chebykin E.P., Kolesnikov S.S., Vodneva E.N. Specific features and factors affecting distribution of metals, rare earth elements, carbon and fluorine in snow cover filtrate and solid sediment in Bratsk. Vestnik IGTU [Bul-

- letin of Irkutsk State Technical University], 2013, No. 10 (81), p. 141–148 (in Russian).
- Akba O., Kilinc E., Aydin I., Erdogan S., Aydin F., Duz M.Z., Hamamci C. Major and trace element contamination of short-term snow cover during and after a dust storm and analysis by ICP-OES. *Atom. Spectros*, 2013, No. 34, p. 48–52.
- AMAP, 2011. *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP). Oslo, Norway, 2011, 538 p.
- Lezhenin A.A., Yaroslavtseva T.V., Raputa V.F. Monitoring of aerosol pollution of snow cover with ground based observation data and satellite information. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. Technol.*, 2016, vol. 9 (7), p. 950–959.
- Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 21, p. 5725–5746.
- Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A., Lata J.-C. Characterization of solid airborne particles deposited in snow in the vicinity of urban fossil fuel thermal power plant (Western Siberia). *Environmental Technology (U.K.)*, 2018, vol. 39 (18), p. 2288–2303.
- Walker T.R., Young S.D., Crittenden P.D., Zhang H. Anthropogenic metal enrichment of snow and soil in north-eastern. *Environmental Pollution*, 2003, vol. 121, p. 11–21.
- Wu G., Li P., Zhang X., Zhang Ch. Using a geochemical method of dissolved and insoluble fractions to characterize surface snow melting and major element elution. *J. Glaciology*, 2018, vol. 64 (248), p. 1003–1013.
- Xue H., Chen W., Li M., Liu B., Li G., Han X. Assessment of major ions and trace elements in snow: A case study across northeastern China, 2017–2018. *Chemosphere*, 2020, vol. 251, p. 1–7.

*Поступила в редакцию 21 июня 2020 г.,  
после доработки – 28 июня 2021 г.,  
принята к публикации 10 сентября 2021 г.*