

УДК 551.578.46: 550.42

ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВА МИКРОЭЛЕМЕНТОВ СНЕГОВОЙ ПЫЛИ ТЮМЕНИ И ТОБОЛЬСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЕРАРХИЧЕСКОГО КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

Захарченко Александр Викторович¹,
avzakh@gmail.com

Пасько Ольга Анатольевна²,
o.pasko@noironline.ru

Тигеев Александр Анатольевич¹,
ttruubbaa@mail.ru

¹ Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера,
Россия, 625026, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

² Национальный открытый институт г. Санкт-Петербург,
Россия, 197183, г. Санкт-Петербург, ул. Сестрорецкая, 6.

Актуальность. Сформированы новые методические подходы оценки аэрозольной миграции веществ и выявления фоновых значений территорий, удаленных от источника загрязнения.

Целью работы является сравнительный анализ кластеров содержания микроэлементов твердой фазы снега в близко расположенных городах Тюмень и Тобольск относительно чистых фоновых и подверженных техногенному воздействию территорий.

Материалы: микроэлементы твердой фазы снегового покрова.

Методы: химико-аналитический метод для определения содержания микроэлементов, иерархический кластерный метод при анализе геохимических спектров, вероятностно-статистический метод.

Результаты. Условно-фоновый кластер С6 присутствует как в Тобольске (22,6 %), так и в Тюмени (11,7 %), а С5 – 13 % в Тобольске и 8 % в Тюмени. Специфичный тобольский техногенный кластер – С8 (48 %) с преобладанием рассеянных элементов. Этот кластер присутствует в Тюмени (2 точки), что указывает на возможность переноса аэрозолей между городами. Техногенные кластеры (С7, С1) различаются по форме геохимического спектра: в одних преобладают тяжелые металлы, в других – рассеянные микроэлементы (С8); то же самое относится к условно-фоновым пробам. Специфический техногенный тюменский кластер С4 выделяется высокими значениями Си и Мо. Для выделенных условно фоновых кластеров характерно низкое содержание микроэлементов; в одних кластерах присутствуют тяжелые металлы, в других – Sc, Cr, Ni, Zn, Cd. При использовании в расчетах кластеров с низким содержанием микроэлементов суммарный показатель загрязнения снега в Тобольске достигает высокого и опасного уровня загрязнения (60,8–83,7), который для Тюмени становится средним и умеренно опасным. Сравнительный анализ кластеров геохимических спектров содержания микроэлементов в снеговой пыли городских и фоновых территорий позволяет более обоснованно оценить уровень загрязнения микроэлементами.

Ключевые слова:

снежный покров, твердые аэрозоли, иерархический кластерный анализ, микроэлементы, региональный перенос, геохимический спектр.

Введение

Содержание микроэлементов снеговой пыли и снеговых вод изучено в Западной Сибири [1–7]. Тяжелые металлы накапливаются на поверхности твердых аэрозольных частиц, переносятся в атмосферном воздухе в виде пыли и осаждаются в снеговом покрове. Этот процесс зависит от множества естественных и антропогенных факторов. Место выпадения твердых аэрозолей определяет преимущественно географический фактор. В зимний период региональные естественные источники поступления пыли ограничены из-за промерзания почв и ближайших морей. Особое значение приобретает близость к южным пустынным территориям, подверженным ветровой эрозии. С этих мест происходит перенос твердых аэрозольных частиц на тысячи километров на север. Для Западной Сибири характерно снижение содержания микроэлементов твердой фракции снега в направлении от степных районов на север к среднетаежным лесам.

Актуальность работы обуславливается формированием новых методических подходов к пространственной оценке аэрозольной миграции веществ в атмосферном воздухе при использовании кластерного анализа геохимических спектров твердой фазы снежного покрова [8, 9]. Зимнее сокращение возможности естественного поступления пыли в атмосферу из региональных источников приводит к преобладанию над ними глобальных антропогенных источников [6]. Например, антропогенное воздействие китайской промышленности на аэрозольный состав воздуха фиксируются на юге Дальневосточного региона России [10]. Показано, что в Казахстане вихревая циркуляция атмосферного воздуха контролирует загрязнение тяжелыми металлами степей Евразии [11]. Анализ химического состава снега и льда может дать ценную информацию об источниках атмосферных аэрозолей, циркуляции атмосферы, экологических изменениях климата и загрязнении территорий [12, 13]. Часто антропогенный фактор приобретает решающее значение в формировании состава твердого атмо-

сферного аэрозоля [14–16]. Техногенные аэрозоли, соединяясь с естественными частицами, формируют локальные области повышенного и даже аномального содержания загрязняющих веществ в снеговом покрове [17–19].

Для геохимической классификации микроэлементного состава снеговой пыли, источников поступления, а также районирования территорий используют иерархический кластерный анализ (ИКА) [6, 17, 20, 21]. Идея данного исследования заключается в сравнительном анализе стандартизованного содержания микроэлементов пыли снегового покрова в точках наблюдения в городах Тюмень и Тобольск с использованием кластеризации. Наличие общих кластеров в Тюмени и Тобольске можно интерпретировать как близость условий формирования пыли снегового покрова, их отсутствие – как специфику загрязнения атмосферного воздуха. Присутствие специфических кластеров в обоих городах указывает на возможность переноса пыли.

Целью работы является анализ кластеров содержания микроэлементов твердой фазы снега относи-

тельно чистых фоновых и подверженных техногенному воздействию территорий для выявления различий в условиях формирования снеговой пыли между Тюменью и Тобольском.

Практическое значение заключается в выработке новых подходов к изучению регионального переноса твердых атмосферных аэрозолей с учетом местной специфики выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Объекты и методы

За основу исследования микроэлементов снеговой пыли взяты два крупных города региона – Тюмень и Тобольск. Тобольск расположен в южно-таежной подзоне (58°12' с. ш., 68°16' в. д. (рис. 1). Основу его промышленного комплекса составляют предприятия химической переработки нефти и энергетики, что может влиять на содержание углеводородов, окислов азота, фенола и пыли [3].

Город Тюмень находится в подзоне подтайги с географическими координатами 57°15' с. ш., 65°54' в. д. (рис. 2).

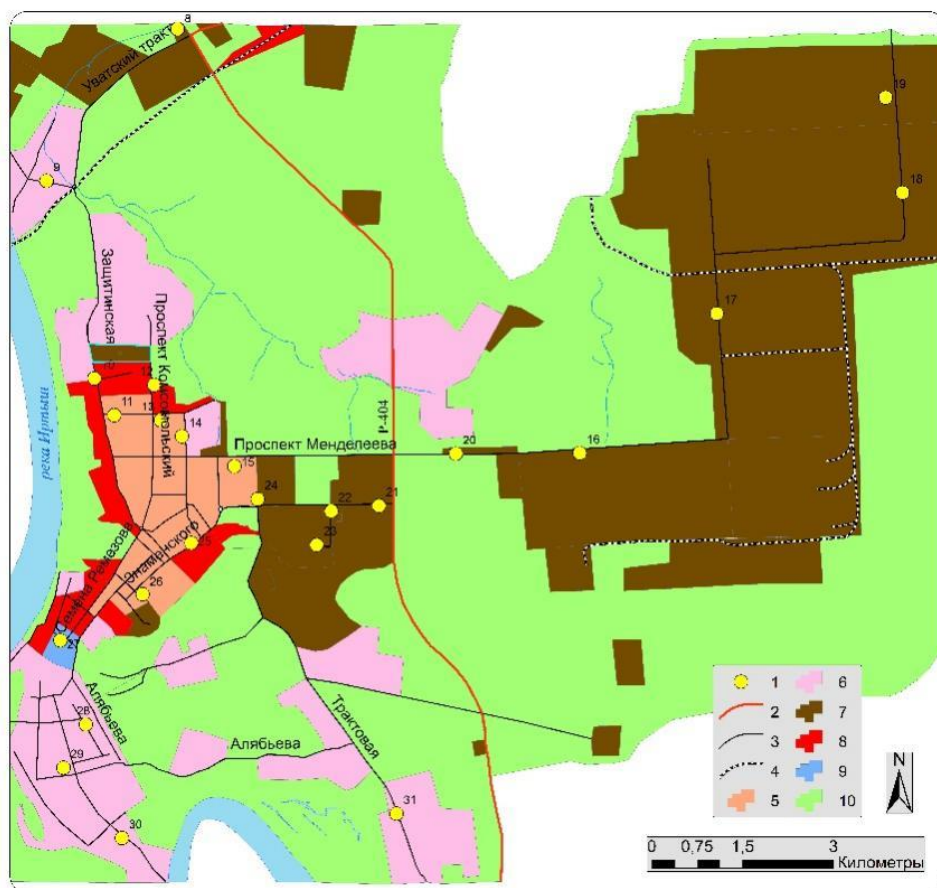


Рис. 1. Расположение точек отбора проб в г. Тобольске [3]: 1 – пункты опробования; 2 – федеральная автодорога Р-404; 3 – дороги общегородского пользования; 4 – железная дорога; 5 – зона многоэтажной застройки; 6 – зона малоэтажной застройки; 7 – зоны производственного и коммунально-складского назначения; 8 – общественно-деловая зона; 9 – зона историко-культурного центра города; 10 – рекреационная зона

Fig. 1. Location of sampling points in Tobolsk [3]: 1 – sampling points; 2 – federal highway R-404; 3 – public roads; 4 – railway; 5 – zone of multi-storey buildings; 6 – zone of low-rise buildings; 7 – zones of industrial and municipal storage purposes; 8 – public business zone; 9 – zone of the historical and cultural center of the city; 10 – recreational area

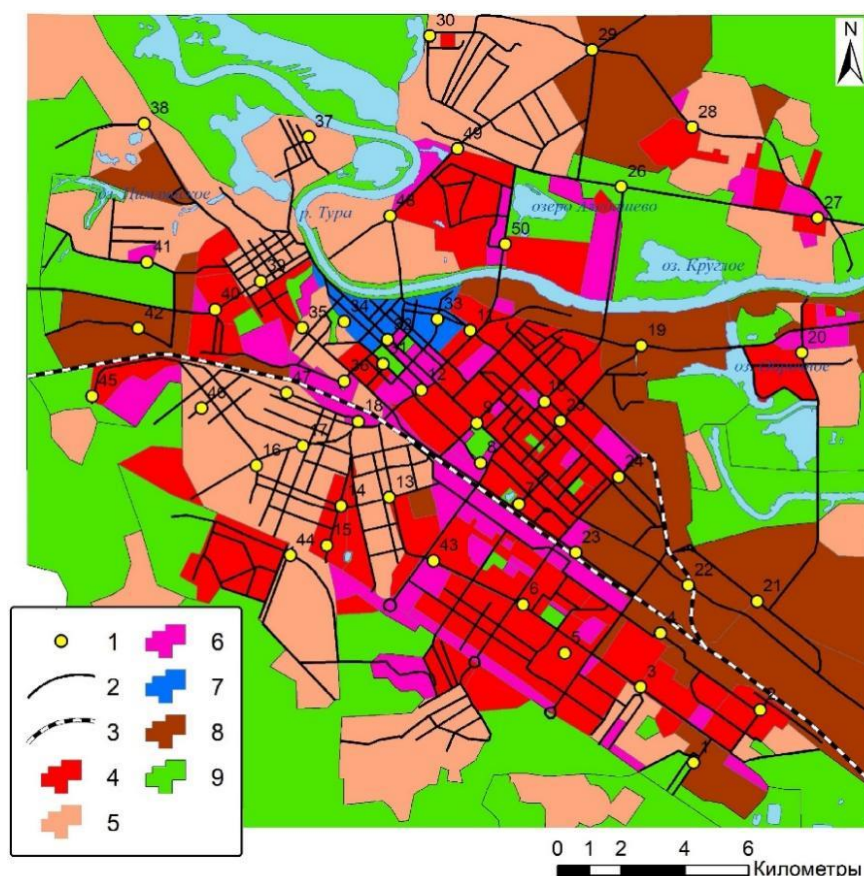


Рис. 2. Расположение точек отбора проб в г. Тюмени [4]: 1 – точки отбора проб снега; 2 – основные автодороги; 3 – железная дорога; 4 – зона многоэтажной застройки; 5 – зона жилой и нежилкой малоэтажной застройки; 6 – общественно-деловая зона; 7 – зона историко-культурного центра; 8 – зона промышленного и коммунально-складского назначения; 9 – зона рекреации, городских лесов и зеленых насаждений

Fig. 2. Location of sampling points in Tyumen [4]: 1 – snow sampling points; 2 – main roads; 3 – railway; 4 – zone of multi-storey buildings; 5 – zone of residential and non-residential low-rise buildings; 6 – public and business zone; 7 – zone of historical and cultural center; 8 – zone of industrial and municipal storage purposes; 9 – zone of recreation, urban forests and green spaces

В городе преобладают предприятия, производящие нефтегазовое оборудование. Специализированным производством можно считать аккумуляторный завод, являющийся источником загрязнения Pb и Cu [14]. Неспециализированный источник загрязнения атмосферного воздуха находится на двух ТЭЦ, не представляющих экологической опасности, так как в виде топлива используется газ [2].

Обор проб снега проведен стандартным снегомером на всю глубину слоя снега [22]. В зависимости от мощности слоя снега отбиралась средняя проба из трех-пяти образцов. Все пробы снега отобраны в 2020 г.: в г. Тюмени взяты 60 проб, в г. Тобольске – 31. Отделение твердой фракции проведено фильтрацией через беззольные нитроцеллюлозные фильтры «Millipore» с диаметром пор 0,45 мкм. Для получения достаточного количества твердого осадка фильтровали 1,5–2 л талой воды. После высушивания фильтров при $t=95\text{ }^{\circ}\text{C}$ они взвешены для определения массы пыли.

Масса пыли рассчитана на литр талой воды (мг/л). Пылевая нагрузка на снеговой покров определена по формуле [23]:

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

где P – поток вещества на единицу поверхности в единицу времени ($\text{мг}/(\text{м}^2 \times \text{сут})$); Pc – вес пыли; S – суммарная площадь отбора проб; T – временной интервал в сутках между моментом опробования и датой установления устойчивого снежного покрова. Для характеристики содержания пыли в снегу взяты минимальные, максимальные и средние значения.

Химико-аналитические работы по определению элементного химического состава твердофазных выпадений (50 элементов) произведены в аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка, Московская область) с дальнейшим расчетом содержания микроэлементов в снеговой пыли ($\text{мг}/\text{кг}$). Содержания отдельных химических элементов в некоторых пробах было ниже порога определения, поэтому в расчетах они использованы не все, а только 24: Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, Ba, W, Pb.

Суммарный показатель загрязнения снеговой пыли Zc определялся согласно общепринятым методи-

кам [22]. Коэффициент концентрации рассчитан по отношению содержания микроэлементов к фоновому значению [23]:

$$Kc_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_{фj}}, \quad (1)$$

где C_{ij} – концентрация j -микроэлемента в i -точке наблюдения; $C_{фj}$ – его фоновая концентрация; Kc_{ij} – коэффициент концентрации j -микроэлемента, интегральный коэффициент загрязнения [24]:

$$Z_c = \sum_{j=1}^n Kc_{ij} - (n - 1), \quad (2)$$

где K – коэффициент концентрации (1); n – число учитываемых элементов с $K > 1,5$.

Значение $C_{фj}$ обычно определяют с помощью условно-фоновых точек. На предприятиях установлены высокие трубы (>100 м) для выбросов загрязняющих веществ, что создает условия для их переноса на большие расстояния и рассеивания с загрязнением удаленных от предприятия территорий. С помощью кластерного анализа выделяются пробы с наименьшим содержанием микроэлементов, в которые не попадают загрязняющие вещества, т. е. формирование микроэлементного состава снеговой пыли происходит только по естественным причинам. Такие точки наблюдаются среди условно-фоновых вне города, а также в городских условиях. В первом случае в фоновые попадают техногенно-загрязненные пробы, что занижает реальное значение Kc_{ij} (1), во втором имеем независимое от наблюдателя условие сравнения отобранных в городе проб.

Содержание микроэлементов в геохимическом спектре может различаться на порядки, что делает невозможным их сравнение в едином статистическом комплексе данных. Корректный анализ геохимических спектров микроэлементов между точками наблюдения возможен при переходе от абсолютных значений содержания к относительным путем стандартизации. Обычно осуществляют нормирование отклонения значения от минимума ($x_{ij} - \min(x_{ij})$) на весь размах шкалы содержания микроэлемента ($\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})$). Для каждой точки наблюдения стандартизованные значения рассчитаны по формуле [20]:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})}, \quad (3)$$

где x_{ij} – содержание химического элемента; $\min(x_{ij})$ – его минимальное значение, $\max(x_{ij})$ – максимальное значение; a_{ij} – безразмерная величина, отражающая нормированное значение содержания элемента.

В этом случае изучаются не различия абсолютных значений содержания элемента, а форма кривой, отражающая различия относительных значений (a_{ij}) содержания химических элементов между точками наблюдения (3), где i – порядковый номер точки отбора пробы, j – порядковый номер химического элемента в списке изученных. Затем определяем вероятностный вклад P_{ij} относительной величины a_{ij} к сумме значений, используемых в расчетах всех химических элементов (n):

$$P_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n (a_{ij}) - a_{ij}}, \quad (4)$$

где P_{ij} – индекс структуры, который является безразмерной величиной, отражающей вероятностный вклад j -го химического элемента, равный отношению нормированных значений a_{ij} к сумме химических элементов (n), исключая из суммы само значение a_{ij} . В каждой пробе имеется n химических элементов, отражающих форму геохимического спектра пробы (P_{ij}).

Кластерный и геоинформационный анализы проведены с помощью программы Orange 3.29.3 с пакетом Geo. Геохимический спектр в каждой точке отбора пробы имеет 24 стандартизованных значения содержания элементов, по которым оценивалась их мера сходства с другими точками с помощью коэффициента корреляции Спирмена. Для кластеризации использован метод Word. Он представляет собой систему вложенных разбиений выборки, в результате получается «дерево», где корень – это вся выборка, а листья – наименьшие группы данных. Кластеры – это объединения проб (точек наблюдения) по схожим относительным геохимическим спектрам. Пакет Geo на основе данных GPS точек наблюдения позволяет визуализировать кластеры на карте местности и оценивать их близость к источникам загрязнения атмосферного воздуха. Для понимания геохимического смысла выделенных кластеров осуществлен переход от относительных стандартизованных безразмерных величин к их номинальным значениям. Рассчитаны средние значения содержания микроэлементов в кластере.

Результаты

К условно-фоновым относят точки наблюдения, которые соответствуют условию удаленности от источников загрязнения атмосферного воздуха на расстояние более 10 км. Обычно отмеряют от городской черты. К условно-городским точкам наблюдения отнесены все точки, расположенные в черте города. Внутри этих территорий выделены кластеры с низким (чистые) и высоким (техногенные) содержанием микроэлементов. Обнаружено проявление широтных закономерностей снижения содержания пыли в снеготалой воде с юга на север от подтайги тюменских ландшафтов к тобольским южно-таежным лесам (табл. 1).

В случае условно-фоновых территорий при переходе от Тюмени к Тобольску наблюдается снижение минимального и среднего значений по содержанию снеговой пыли и пылевой нагрузки, что соответствует широтной тенденции в регионе [6, 7]. Их максимальные значения в Тобольске в два раза выше, чем в Тюмени, что обусловлено различием техногенного поступления пыли в снеговую покров территорий. По содержанию пыли в талой воде для городских точек минимальные значения имеют сходство с условно-фоновыми точками наблюдения. Следует отметить, что средние значения не различаются между городами, а максимальные в три раза выше в Тобольске, чем

в Тюмени. По пылевой нагрузке наблюдаются еще большие различия по минимальным значениям, в то время как средние значения между городами различаются несущественно. Для кластеризации в иерар-

хическом кластерном анализе использован индекс структуры геохимических спектров микроэлементов (4), общий для Тюмени и Тобольска. Выделено восемь кластеров (рис. 3).

Таблица 1. Изменение содержания твердой фазы в снеготалой воде (мг/л), пылевая нагрузка (мг/м²сут.) в городах и на условно-фоновых территориях

Table 1. Change in solid phase content in snowmelt water (mg/l), dust load (mg/m² day) in cities and conditionally background areas

Города/Cities	Единицы измерения Units	Широта Latitude	Фоновые места/Background sites			Городские точки City sites		
			Мин Min	Макс Max	Средние Average	Мин Min	Макс Max	Средние Average
Тюмень/Tyumen	мг/л/mg/l	57°15'	4,1	10,9	7,5	9,4	121	37,1
Тобольск/Tobolsk		58°12'	2,2	22,6	5,7	4,4	316,3	30,2
Тюмень/Tyumen	мг/м ² сут mg/m ² day	57°15'	2,4	8,3	5,5	5,4	94,3	20
Тобольск/Tobolsk		58°12'	1,4	11,6	4,0	4,3	406,3	32,1

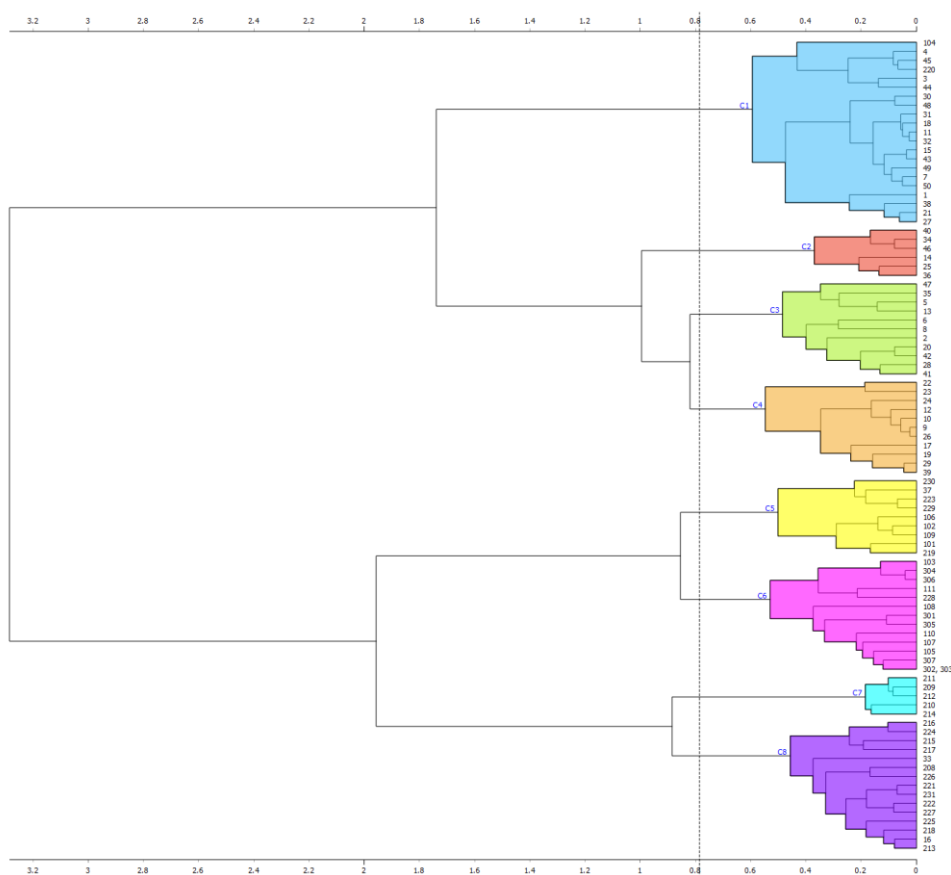


Рис. 3. Иерархическая структура кластеров C1–C8 геохимических спектров микроэлементов точек наблюдения: 1–50 – в городской черте г. Тюмени, 101–111 – на значительном удалении от г. Тюмени, 208–231 – в городской черте и в промышленной зоне г. Тобольска, 301–307 – фоновые участки г. Тобольска

Fig. 3. Hierarchical structure of C1–C8 clusters of geochemical spectra of microelements of observation points: 1–50 – in the city of Tyumen, 101–111 – at a considerable distance from Tyumen, 208–231 – in the city and industrial zone of the city Tobolsk, 301–307 – background areas of the city of Tobolsk

На высшем уровне иерархии обособились преобладающие внутригородские тюменские кластеры (C1–C4) и преобладающие тобольские (C5–C8). Тюменская группа кластеров делится на кластеры, подверженные воздействию городской среды (C1, C4) и относящиеся к городским фоновым или низкого уровня воздействия (C2, C3). С другой стороны, тобольская группа делится на два относительно чистых

кластера – C5 и C6. Тобольские кластеры C7 и C8 имеют повышенное содержание тяжелых металлов и рассеянных микроэлементов. По форме геохимического спектра они аналогичны техногенным тюменским кластерам C1 и C4.

Кластеры C1–C4 характерны для Тюмени, C7 встречается исключительно в Тобольске, остальные кластеры могут быть общими для этих городов (рис. 4).

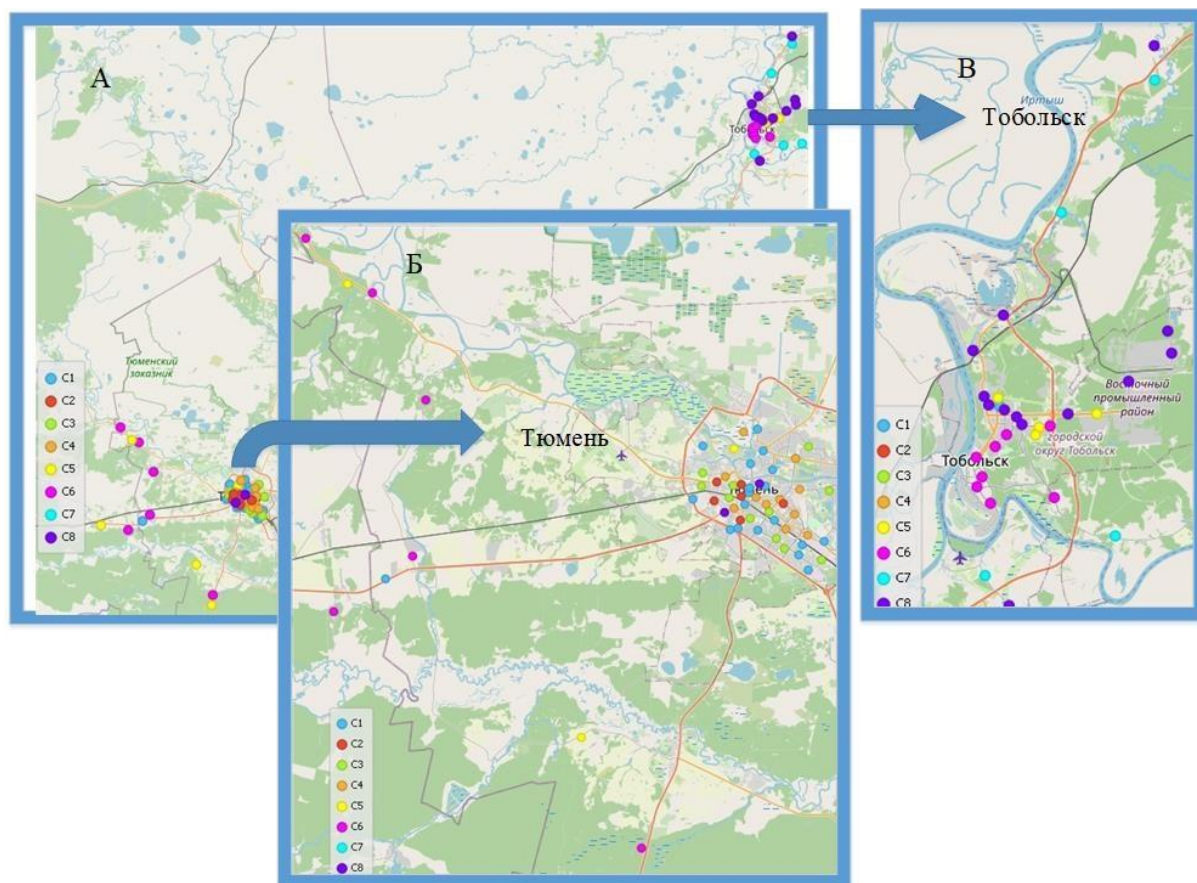


Рис. 4. Распределение общих кластеров относительного содержания микроэлементов снеговой пыли: А – между городами, Б – в Тюмени, В – Тобольске. Цветом показаны точки расположения кластеров С1–С8

Fig. 4. Distribution of common clusters of the relative content of trace elements in snow dust: A – between cities, B – in Tyumen, C – in Tobolsk. The color shows the location of the clusters C1–C8

Техногенный кластер С1 объединяет 21 точку (34,4 % от их общего числа в городе). Исключением является тюменская точка 220 кластера С1, расположенная в Тобольске, что указывает на возможность схожих условий формирования микроэлементного состава снеговой пыли этих городов. Кластер С2 объединяет 6 точек, располагаясь вблизи аккумуляторного завода. Кластер С3 объединяет 11 точек с относительно низким содержанием микроэлементов (городские фоновые). Точки техногенного С4 (11 точек, 18,0 %) концентрируются вблизи промышленной зоны и автомагистралей. Условно-фоновый кластер С5 (девять точек), находится на удалении от г. Тюмени (8 %), хотя внутри городской черты имеется т. 37; он также встречается в северной части г. Тобольска и его промышленной зоне (13 %). Кластер С5 имеет низкое относительное содержание микроэлементов и может рассматриваться в качестве местного фона. Серебряно-оловянный фоновый кластер С6, который также имеет низкие значения содержания микроэлементов, встречается как в низкоэтажной застройке южной части Тобольска (22,6 %), так и на удалении от Тюмени (условно-фоновые) (11,7 %). Наиболее высокое относительное содержание микроэлементов отмечается в кластерах С7 (16 %) в точках, расположенных на удалении от промышленной зоны Тобольска. Кластер С8

(48 %) характерен для промышленной зоны г. Тобольска, но две точки С8 обнаружены в Тюмени.

Обсуждение

Фоновые участки неоднородны [7]. Они делятся на три кластера: фоновые городские, фоновые чистые и фоновые серебряно-оловянные. Отличие в том, что в Тобольске они находятся внутри городской черты, а в Тюмени преимущественно на удалении от города. В городской черте формируются специфичные фоновые участки снегового покрова (С3). В Тобольске снеговая пыль с высоким содержанием тяжелых металлов обнаружена на удалении от источника выброса, за городской чертой. Похожая ситуация складывается с положением техногенного кластера С8, точки которого концентрируются на территории северной части г. Тобольска и на удалении от него. Аналогично, в пробах снеготалой воды на Шельмовских островах и в устье реки Якта в сотнях километрах от Норильска обнаружено повышенное содержание свинца [18]. Здесь пылевая нагрузка составляет 35–1000 кг/км² и распределена на площади 755 км², распространяясь на расстояние 30–40 км от города. Это существенно больше того, что выявлено в Тобольске (406 кг/км²), где крайняя точка техногенного кластера С8 отстоит от промышленной зоны на 20 км.

Экологическую оценку степени загрязнения территорий, соответствующих выделенным кластерам, можно произвести путем перехода от стандартизо-

ванных относительных значений к средним веществным значениям содержания микроэлементов в кластерах (табл. 2).

Таблица 2. Средние значения содержания микроэлементов в снеговой пыли (мг/кг) для кластеров Тюмени и Тобольска (C1–C8)

Table 2. Average values of microelement content in snow dust (mg/kg) for Tyumen and Tobolsk clusters (C1–C8)

Элементы, показатели Elements, indicators	Кластеры/Clusters							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Li	5,2	3,6	1,7	5,7	3,3	2,7	9,1	11,1
Sc	8,6	3,6	2,2	8,0	2,0	1,5	10,9	8,2
V	5,4	3,1	1,5	5,8	2,9	4,2	4,6	6,0
Cr	11,2	4,2	3,0	9,4	1,9	2,4	14,2	9,3
Co	13,2	4,6	3,2	10,4	1,2	1,5	17,1	8,5
Ni	12,9	4,3	3,2	10,0	1,1	1,9	20,1	7,8
Cu	5,0	5,4	3,0	8,8	2,3	1,9	5,5	6,1
Zn	3,4	2,8	2,1	4,4	1,4	1,7	11,7	6,6
Ga	4,3	3,3	1,6	4,8	3,0	3,6	6,8	8,3
As	3,1	3,9	1,3	4,1	1,6	3,7	9,0	9,9
Rb	3,8	3,3	1,4	3,9	4,1	3,3	10,6	15,6
Sr	6,4	6,1	2,6	6,8	3,2	3,0	9,7	12,4
Y	5,1	3,7	1,7	5,5	2,9	2,8	9,1	10,7
Zr	5,8	5,3	2,1	7,4	3,1	3,6	10,4	12,2
Nb	4,2	3,7	1,8	5,6	2,8	3,2	6,7	10,0
Mo	4,3	4,6	2,4	8,6	2,7	4,3	4,6	3,9
Ag	0,9	1,2	1,3	1,3	1,4	7,1	1,8	1,6
Cd	3,9	4,4	2,9	6,0	2,2	3,7	9,1	8,4
Sn	3,8	3,7	1,8	5,0	1,3	10,0	3,0	2,8
Sb	10,6	10,7	4,5	16,1	3,2	3,2	7,4	7,8
Cs	3,3	2,5	1,1	3,3	2,7	2,3	6,7	8,6
Ba	9,6	10,4	5,5	13,7	5,7	4,3	14,9	21,4
W	16,7	5,3	4,5	15,3	1,7	2,0	14,0	7,9
Pb	5,1	18,3	4,6	11,1	6,0	6,7	5,8	8,0
Макс*/Max	1	2	0	2	0	2	6	11
Мин*/Min	1	0	11	0	7	2	0	0
Zc (2)	46,6	17,2	0,0	55,0	0,0	0,0	83,7	60,8

*Количество максимальных значений (Max) в ряду кластеров показано полужирным шрифтом, минимальные (Min) – курсивом.

*The number of maximum values (Max) in a series of clusters is shown in bold, minimum values (Min) in italics.

Для каждого микроэлемента в ряду восьми кластеров выделяются максимальные (Max) и минимальные (Min) значения его содержания. Кластер C8 включает 11 максимальных значений из 24 возможных реализаций; минимальные значения отсутствуют. По набору микроэлементов он специфичен для Тобольска. Соответствующие географически точки расположены в северной части города, вблизи промышленной зоны, которая является источником загрязнения воздуха. По сравнению с C7 содержание Ni, Zn, Cr, Co, Cd меньше в кластере C8, но заметно повышено для редких и рассеянных элементов, особенно Rb, Sc и Ba. В Тюмени две точки C8 находятся у второстепенных дорог, в средневысотной застройке, то есть промышленный источник микроэлементов отсутствует. Причиной загрязнения можно предложить атмосферный перенос, вызывающий мозаичное выпадение тобольской пыли в Тюмени. Например, явления регионального переноса отмечены в Польше для региональных шлейфов городского и промышленного загрязнения, несущих частые южные и юго-восточные адвекции сильно загрязненных воздушных масс [16]. Противоположный кластеру рассеянных микроэлементов (C8) кластер C3 содержит 11 минимальных значений содержания микроэлементов в снеговой пыли при отсутствии максимальных.

Его можно считать городским фоновым, но он не встречается на удалении от города в составе условно-фоновых. Геохимические спектры кластеров C1 и C7 схожи по форме, имеют повышенное содержание тяжелых металлов, хотя характеризуют загрязнение разных городов. Кластер C7 содержит шесть максимумов тяжелых металлов: Sc, Cr, Ni, Zn, Cd. В C1 максимумы совпадают, но содержание тяжелых металлов в них ниже, чем в C7. Микроэлементы Cd, Cu, Ni, Pb и Zn обычно связаны с антропогенными источниками поступления загрязнения в атмосферу [9]. Например, добыча и плавка цветных металлов обогащают аэрозоли Cr, As, Ba и Zn, сжигание угля – Pb, Zn, Se, Cu и Mn, сжигание твердых бытовых отходов – Cd и Mo [25, 26].

Кластер C4 специфичен для Тюмени. Он имеет в спектре два максимума у элементов Cu, Mo и повышенное содержание у Zn, Pb, Cd. Такое соотношение Pb, Cd, Cu, Zn характерно для дорожной пыли [27]. Для снеговой пыли Тобольска Д.В. Московченко с соавторами [6] рассчитали коэффициент обогащения пылеаэрозолей (КО). Считается, что если КО<10, то источник естественный, если КО>100, то элемент имеет техногенное происхождение. Оказалось, что КО>100 для Ag и Sn фоновых условий Тобольска. Все эти точки объединены в кластере C6, который

наблюдается среди условно-фоновых точек Тюмени и в Тобольске. Кластер С5 также относится к фоновым, имеет семь минимумов и встречается в обоих городах. Кластер С2 специфичен для Тюмени, он содержит максимумы Sb и Pb. Повышенная концентрация свинца относительно фона обнаружена в районе аккумуляторного завода и в частном секторе, он попадает в атмосферу при сжигании твердого топлива [13]. Существует мнение [28], что основным источником загрязнения снега в городе является автотранспорт.

Для расчета Кс (1) в качестве фоновых нами взяты значения условно-фоновых кластера С5, который присутствует как в Тюмени, так и в Тобольске. Интегральный коэффициент загрязнения Zс (2) в тобольских кластерах С7 и С8 достигает 60,8–83,7, что означает высокий и опасный уровень загрязнения [22]. Ранее в Тобольске [6] опубликованы более низкие значения загрязнения Zс от 16 (промышленная зона) до 29 (многоэтажная застройка), что вызывает сомнения, так как Тобольск более насыщен крупными промышленными предприятиями, чем Тюмень. Средняя пылевая нагрузка в нем достигает 32 мг/м²сут, что выше, чем в Тюмени (20 мг/м²сут.), а пылевая нагрузка в городе выше фоновых значений в 4,7 раза. Возможно, для расчета интегрального показателя загрязнения использованы условно-фоновые точки, загрязненные промышленными выбросами в атмосферу. Кластерный анализ позволяет группировать точки, находящиеся в условиях формирования пылевого пула, более точно подходящих под определение фона, как участки с наименьшим количеством поступивших загрязнений атмосферы от местных антропогенных источников. В Тюмени уровень загрязнения кластеров С1, С4 относится к среднему, умеренно опасному Zс (32–64), находящемуся в пределах 46,6–55,0. По литературным данным [2] значения Zс меняются в пределах от многоэтажной застройки (80), промышленных предприятий (91) до одноэтажной застройки (105), что указывает на опасный уровень загрязнения. Это подтверждается результатами, полученными с использованием ИКА. Тюменский кластер С2 имеет низкий и неопасный уровень загрязнения (17), а Zс для экологически чистых кластеров С6 и С3 равен нулю.

Выводы

1. Минимальные фоновые значения пылевой нагрузки в Тобольске составляют 1,4 мг/м²сут, средние – 4 мг/м²сут, что ниже, чем в Тюмени. Максимальные фоновые значения пылевой нагрузки в Тобольске выше, чем в Тюмени, что связано с местным фактором, так как максимальное содержание

пыли в снегу в Тобольске (406 мг/м²сут), почти в 3 раза выше, чем в Тюмени (121 мг/м²сут).

2. Кластерная структура микроэлементного состава снеговой пыли разделяется на две большие группы – тюменские внутригородские и тобольские, которые делятся на загрязненные микроэлементами и относительно чистые участки. Тобольские кластеры С7 и С8 имеют высокий уровень техногенного загрязнения и схожи по форме геохимического спектра с тюменскими С1 и С4.
3. Техногенные кластеры (С7, С1) различаются по форме геохимического спектра: в одних преобладают тяжелые металлы, в других – рассеянные микроэлементы (С8); то же самое относится к условно-фоновым пробам. Специфический техногенный тюменский кластер С4 выделяется высокими значениями Cu и Mo.
4. Кластерный анализ выявляет три кластера с низким содержанием микроэлементов: 1) относительно чистые городские (С3), 2) тюменские условно-фоновые чистые и чистые городские Тобольска (С5) и 3) условно-фоновые серебряно-оловянные (С6). Поэтому для выделения фоновых участков снегового покрова недостаточно выполнять условие пространственной удаленности более 10 км от источников загрязнения, а следует провести их кластеризацию.
5. Некоторые незагрязненные микроэлементами кластеры, например С6, присутствуют не только в Тобольске (22,6 %), но и вблизи Тюмени в виде фоновых участков (11,7 %), то же относится к С5 – 13 % в Тобольске и 8 % в Тюмени.
6. Специфичный тобольский кластер рассеянных элементов С8 (48 %) встречается в двух точках в пределах городской черты Тюмени, где отсутствуют аналогичные промышленные источники загрязнения для формирования такого состава снеговой пыли.
7. Техногенный кластер С7 находится только в Тобольске. Специфичными для Тюмени являются относительно чистый кластер С3 и загрязненный рассеянными микроэлементами кластер С4.
8. При их использовании в качестве фона суммарный показатель загрязнения Zс снега в Тобольске достигает высокого и опасного уровня загрязнения (60,8–83,7). Для Тюмени уровень загрязнения техногенных кластеров характеризуется как средний и умеренно опасный Zс (32–64). Использование кластерного анализа позволяет объективно определять уровень загрязнения снега.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-50062/20.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов В.Б., Мухаметдинова Э.А., Королик В.С. Распределение загрязнения тяжелыми металлами в снежном покрове г. Нижневартовск // Вестник ТюмГУ. – 2010. – № 3. – С. 148–153.
2. Concentrations of major and trace elements within the snowpack of Tyumen, Russia / D.V. Moskovchenko, R.Yu. Pozhitkov, A.V. Zakharченко, A.A. Tigeev // Minerals. – 2021. URL: <https://doi.org/10.3390/min11070709> (дата обращения 01.02.2023).
3. Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В. Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. – Т. 335 – № 5. – С. 156–169. DOI: 0.18799/24131830/2021/05/319.
4. Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени / Д.В. Московченко, Р.Ю. Пожитков, А.Н. Курчатова, Р.И. Тимшанов // Вестник МГУ. Серия 5. География. – 2021. – № 3. – С. 13–26.

5. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic / V.P. Shevchenko, A.A. Vinogradova, A.P. Lisitzin, A.N. Novigatsky, M.V. Panchenko, V.V. Polkin // Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar environments. – Berlin; Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2016. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12315-3_5 (дата обращения 01.02.2023).
6. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient / V.P. Shevchenko, S.P. Oleg, N.V. Sergey, I.V. Krickov, R.M. Manasyrov, N.V. Politova, S.G. Kopysov, O.M. Dara, Y.V. Auda, L.S. Shirokova, L.G. Kolesnichenko, V.A. Zemtsov, S.N. Kirpotin // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2017. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017> (дата обращения 01.02.2023).
7. Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А. Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 09. – С. 790–800.
8. Atmospheric deposition: sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature / M. Amodio, S. Catino, P.R. Dambruoso, G. de Gennaro, A. di Gilio, P. Giungato, M. Tutino // Advances in Meteorology. – 2014. DOI: 10.1155/2014/161730.
9. Степанец В.Н., Серых Т.Г., Папина Т.С. Оценка содержания микроэлементов в снежном покрове юга Западной Сибири // Гидрометеорология и экология. – 2021. – № 64. – С. 480–491. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-480-492.
10. Кондратьев И.И. Атмосферный трансграничный перенос загрязняющих веществ из центров эмиссии восточной Азии на юг Дальневосточного региона России // Вестник ДВО РАН. – 2008. – № 1. – С. 107–112.
11. Ormanova G., Karaca F., Kononova N. Analysis of the impacts of atmospheric circulation patterns on the regional air quality over the geographical center of the Eurasian continent // Atmospheric research. – 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104858.
12. Li Z., Li H., Dong Z. I. Chemical characteristics and environmental significance of fresh snow deposition on Urumqi Glacier No. 1 of Tianshan Mountains, China // Chin. Geogr. – 2010. – V. 20. URL: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0412-6> (дата обращения 01.02.2023).
13. Integrated evaluation of aerogenic pollution by air-transported heavy metals (Pb, Cd, Ni, Zn, Mn and Cu) in the analysis of the main deposit media / E. Baltreinaite, P. Baltrenas, A. Lietuvninkas, V. Sereviciene, E. Zuokaite // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2014. DOI: 10.3846/enviro.2017.048
14. Химико-экологическая оценка загрязнения свинцом атмосферы города Тюмени / Е.В. Крестьянникова, В.В. Козлова, Н.С. Ларина, С.И. Ларин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17. – № 5 (2). – С. 679–684.
15. Distribution of major elements between the dissolved and insoluble fractions in surface snow at Urumqi Glacier. No. 1, Eastern Tien Shan / C. Zhang, G. Wu, S. Gao, Z. Zhao, X. Zhang, L. Tian, Y. Mu, D. Joswiak // Atmos. Res. – 2013. DOI: 10.1007/s11434-011-4684-8
16. Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland // Environ. Monit. Assess. – 2015. DOI: 10.1007/s10661-015-4446-1.
17. Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk Town (Russia) by pollution level / A. Onuchin, G. Kofman, O. Zubareva, I. Danilova // Polish Journ. of Environmental Studies. – 2020. DOI: 10.15244/pjoes/118168.
18. Загрязнение снежного покрова в зоне воздействия предприятий Норильского промышленного района / А.А. Онучин, Т.А. Буренина, О.Н. Зубарева, О.В. Трефилова, И.В. Данилова // Сибирский экологический журнал. – 2014. – № 6. – С. 1025–1037.
19. Таловская А.В., Филимонов Е.А., Языков Е.Г. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – № 6. – С. 491–495.
20. Гилязов А.Ф. Кластерный анализ как инструмент районирования территории по крупности речных наносов (на примере бассейна Волги) // Вестник Удмуртского университета. Биология. Науки о Земле. – 2015. – Т. 25. – Вып. 2. – С. 149–158.
21. Farida M.S., El-Dars E.N., Sami H.M. Interpretation of hydrogeochemical data using Hierarchical Cluster Analysis: a case study at Wadi El-Natron, Egypt // Journal of African Earth Sciences. – 2020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103930> (дата обращения 01.02.2023).
22. Методические рекомендации по геохимическим оценкам загрязнения территории городов химическими элементами / Б.А. Ревич, Ю.Е. Саэт, Р.С. Смирнова, Е.П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 12 с.
23. Геохимия снежного покрова в восточном округе Москвы / Н.С. Касимов, Н.Е. Кошелева, Д.В. Власов, Е.В. Терская // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2012. – № 4. – С. 14–24.
24. Водяницкий Ю.Н. Формулы оценки суммарного загрязнения почв тяжелыми металлами и металлоидами // Почвоведение. – 2010. DOI: 10.1134/S106422931010011X
25. Chemical characterization of surface snow in Istanbul (NW Turkey) and their association with atmospheric circulations / A. Baysal, H. Baltaci, N. Ozbek, O. Destanoglu, G. Ustabasi, G. Gumus // Environ. Monit. Assess. – 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-5982-7.
26. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: Regional sources and cloud processing / T. Li, Y. Wang, W.J. Li, J.M. Chen, T. Wang, W.X. Wang // Atmos. Chem. Phys. Discuss. – 2015. DOI: 10.5194/acpd-15-13001-201529.
27. Integrated evaluation of road transport pollution impact on the urban air / V. Šerevičienė, V. Vasiliauskienė, D. Paliulis, J. Aleknaitė // Environmental Engineering: 10th International Conference. – Vilnius, Lithuania, 27–28 April 2017. DOI: 10.3846/enviro.2017.048.
28. Viklander M. Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Lulea, Sweden // Water Air Soil Pollut. – 1999. DOI: 10.1023/A:1005121116829.

Поступила: 31.01.2023 г.

Прошла рецензирование: 12.03.2023 г.

Информация об авторах

Захарченко А.В., доктор биологических наук, главный научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера.

Пасько О.А., доктор сельскохозяйственных наук, проректор по научной работе, Национальный открытый институт г. Санкт-Петербурга.

Тигеев А.А., кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Тюменский научный центр СО РАН, Институт проблем освоения Севера.

UDC 551.578.46: 550.42

FORMATION OF THE COMPOSITION OF TRACE ELEMENTS OF SNOW DUST IN TYUMEN AND TOBOLSK USING HIERARCHICAL CLUSTER ANALYSIS

Alexander V. Zakharchenko¹,
avzakh@gmail.com

Olga A. Pasko²,
o.pasko@noironline.ru

Alexander A. Tigeev¹,
ttruubbaa@mail.ru

¹ Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Institute of the Problems of Northern Development,
86, Malygin street, Tyumen, 625026, Russia.

² Saint-Petersburg National Open Institute,
6, Sestroretskaya street, St. Petersburg, 197183, Russia.

The relevance: search for new methodological approaches and techniques for assessing the aerosol migration of substances and characterizing air pollution.

The purpose of the work is a comparative analysis of clusters of the content of microelements of the solid phase of snow in the closely located cities of Tyumen and Tobolsk with respect to clean background and areas subject to technogenic impact.

The materials: the trace elements of solid phase of the snow cover.

The methods: chemical-analytical for determining the content of trace elements, hierarchical cluster in the analysis of geochemical spectra, probabilistic-statistical.

Results. The background dust load in Tobolsk is less, and the inner city load is higher compared to Tyumen. A cluster data structure of 8 clusters has been established with the allocation of two large groups that combine the Tobolsk and Tyumen sites, which are divided into clusters with low and high content of trace elements.

Conclusions. The conditionally background cluster C6 is present in Tobolsk (22,6 %) and Tyumen (11,7 %), and C5 – 13 % in Tobolsk and 8 % in Tyumen. A specific Tobolsk cluster C8 with a predominance of scattered elements (48 %) was found at 2 sites in Tyumen, which may indicate a possible transfer of aerosols between these cities. Some technogenic clusters contained heavy metals, while others were dominated by Sc, Cr, Ni, Zn, and Cd. Technogenic clusters (C7, C1) differ in the shape of the geochemical spectrum: heavy metals predominate in some, trace elements (C8) predominate in others; the same applies to conditionally background samples. The specific technogenic Tyumen cluster C4 is distinguished by high values of Cu and Mo. Conditionally isolated background clusters had a low content of microelements. To identify environmental conditions, we moved from the standardized values of cluster analysis to their material content. It is shown that some clusters contain heavy metals, while others contain Sc, Cr, Ni, Zn, and Cd. Conditionally isolated background clusters had a low content of microelements. Using the content of microelements of the C5 cluster as a background, the environmental index of pollution Zc was calculated, which in Tobolsk reaches a high and dangerous level of pollution 60,8–83,7, in Tyumen – an average, moderately dangerous level Zc (32–64). The use of cluster analysis makes it possible to determine the trace elements pollution of snow dust and the territory as a whole.

Key words:

snow cover, solid aerosols, cluster analysis, trace elements, regional transport, geochemical spectra.

This study was supported by Russian Foundation for Basic Research, grant no. 19-05-50062/20.

REFERENCES

- Ivanov V.B., Mukhametdinova E.A., Korolik V.S. Allocations of heavy metal pollution in the snow cover of Nizhnevartovsk City. *Tyumen State University Herald. Natural Resource Use and Ecology*, 2010, no. 3, pp. 148–153. In Rus.
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Zakharchenko A.V., Tigeev A.A. Concentrations of major and trace elements within the snowpack of Tyumen, Russia. *Minerals*, 2021. Available at: <https://doi.org/10.3390/min11070709> (accessed 1 February 2023).
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Soromotin A.V. Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 5, pp. 156–169. In Rus.
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R.Yu., Kurchatova A.N., Timshanov R.I. Geochemistry of snow cover within the tyumen city. *Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography. Bulletin of the Moscow University. Series 5. Geography*, 2021, no 3, pp. 13–26. In Rus.
- Shevchenko V.P., Vinogradova A.A., Lisitzin A.P., Novigatsky A.N., Panchenko M.V., Polkin V.V. Aeolian and ice transport of matter (including pollutants) in the Arctic. *Implications and Consequences of Anthropogenic Pollution in Polar environments*. Berlin, Heidelberg, Germany, Springer-Verlag, 2016. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-642-12315-3_5 (accessed 1 February 2023).
- Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N. Impact of snow deposition on major and trace element concentrations and elementary fluxes in surface waters of the Western Siberian Lowland across a 1700 km latitudinal gradient. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2017, vol. 21, pp. 5725–5746. Available at: <https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017> (accessed 1 February 2023).
- Ermolov Yu.V., Makhmatkov I.D., Khudyaev S.A. Background concentration of chemical elements in snow cover of the typical

- regions of the Western Siberia. *Optics of the atmosphere and the ocean*, 2014, vol. 27, no. 9, pp. 790–800. In Rus.
8. Amodio M., Catino S., Dambruoso P.R., De Gennaro G., Di Gilio A., Giungato P., Tutino M. Atmospheric deposition: sampling procedures, analytical methods, and main recent findings from the scientific literature. *Advances in Meteorology*, 2014. DOI: 10.1155/2014/161730.
 9. Stepanets V.N., Serykh T.G., Papina T.S. Chemical composition of snow cover in the south of Western Siberia. *Journal of Hydro-meteorology and Ecology*, 2021. In Rus. DOI: 10.33933/2713-3001-2021-64-480-492.
 10. Kondratev I.I. Atmospheric transboundary pollutants transport from emission centers in East Asia to the South of the Far-Eastern region of Russia. *Vestnik DVO RAN*, 2008, no. 1, pp. 107–113. In Rus.
 11. Ormanova G., Karaca F., Kononova N. Analysis of the impacts of atmospheric circulation patterns on the regional air quality over the geographical center of the Eurasian continent. *Atmospheric research*, 2020. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104858.
 12. Li Z., Li H., Dong Z. Chemical characteristics and environmental significance of fresh snow deposition on Urumqi Glacier No. 1 of Tianshan Mountains, China. *Chinese Geographical Science*. 2010. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11769-010-0412-6> (accessed 1 February 2023).
 13. Baltreinaite E., Baltrenas P., Lietuvninkas A., Sereviciene V., Zuokaite E. Integrated evaluation of aerogenic pollution by air-transported heavy metals (Pb, Cd, Ni, Zn, Mn and Cu) in the analysis of the main deposit media. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014. DOI: 10.3846/enviro.2017.048.
 14. Kretyannikova 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. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy*, 2015, vol. 17, pp. 679–684. In Rus.
 15. Zhang C., Wu G., Gao S., Zhao Z., Zhang X., Tian L., Mu Y., Joswiak D. Distribution of major elements between the dissolved and insoluble fractions in surface snow at Urumqi Glacier. No. 1, Eastern Tien Shan. *Atmospheric Research*, 2013. DOI: 10.1007/s11434-011-4684-8.
 16. Siudek P., Frankowski M., Siepak J. Trace element distribution in the snow cover from an urban area in central Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015. DOI: 10.1007/s10661-015-4446-1.
 17. Onuchin A., Kofman G., Zubareva O., Danilova I. Using an urban snow cover composition-based cluster analysis to zone Krasnoyarsk Town (Russia) by pollution level. *Polish Journ. of Environmental Studies*, 2020. DOI: 10.15244/pjoes/118168.
 18. 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 areas. *Sibirskiy ekologicheskii zhurnal*, 2014, no. 7 (6), pp. 714–722. In Rus.
 19. Talovskaya A.V., Filimonenko E.A., Yazikov E.G. Dynamics of the elemental composition of the snow cover in the north-eastern zone of influence of Tomsk-Seversk industrial agglomeration. *Optics of the atmosphere and ocean*, 2014, vol. 27, no. 6, p. 491–495. In Rus.
 20. Gilyazov A.F. Cluster analysis as a tool of zoning according to the size of river sediments (by the example of Volga basin). *Bulletin of Udmurt University. Series Biology Earth Sciences*, 2015, vol. 25, no. 2, pp. 149–158. In Rus.
 21. Farida M.S., El-Dars E.N., Sami H.M. Interpretation of hydrogeochemical data using Hierarchical Cluster Analysis: a case study at Wadi El-Natron, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103930> (accessed 1 February 2023).
 22. Revich B.A., Saet Yu.E., Smirnova R.S., Sorokina E.P. *Metodicheskie rekomendatsii po geokhimicheskoy otsenke zagryazneniya territorii gorodov khimicheskimi elementami* [Methodological recommendations on the geochemical assessment of urban pollution by chemical elements]. Moscow, IMGRE Publ., 1982. 112 p.
 23. Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Terskaya E.V. Geochemistry of snow cover within the Eastern district of Moscow. *Bulletin of the Moscow University. Geography*, 2012, vol. 4, pp. 14–24. In Rus.
 24. Vodyanitskii Y.N. Equations for assessing the total contamination of soils with heavy metals and metalloids. *Eurasian Soil Science*, 2010. In Rus. DOI: 10.1134/S106422931010011X.
 25. Baysal A., Baltaci H., Ozbek N., Destanoglu O., Ustabasi G., Gumus G. Chemical characterization of surface snow in Istanbul (NW Turkey) and their association with atmospheric circulations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017. DOI: 10.1007/s10661-017-5982-7.
 26. Li T., Wang Y., Li W.J., Chen J.M., Wang T., Wang W.X. Concentrations and solubility of trace elements in fine particles at a mountain site, southern China: regional sources and cloud processing. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015. DOI: 10.5194/acpd-15-13001-201529.
 27. Šerevičienė V., Vasiliauskienė V., Paliulis D., Aleknaitė J. Integrated evaluation of road transport pollution impact on the urban air. *Environmental Engineering. 10th International Conference*. Vilnius, Lithuania, 27–28 April 2017. DOI: 10.3846/enviro.2017.048.
 28. Viklander M. Substances in urban snow. A comparison of the contamination of snow in different parts of the city of Lulea, Sweden. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1999. DOI: 10.1023/A:1005121116829.

Received: 31 January 2023.

Reviewed: 12 March 2023.

Information about the authors

Alexander V. Zakharchenko, principal scientist, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Institute of the Problems of Northern Development.

Olga A. Pasko, Dr. Sc., vice-rector for research, Saint-Petersburg National Open Institute.

Alexander A. Tigeev, Cand. Sc., senior researcher, Tyumen Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Institute of the Problems of Northern Development.