

УДК 550.46 (571.53)

О ФОНОВЫХ НАБЛЮДЕНИЯХ СОДЕРЖАНИЯ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ТВЁРДОЙ ФАЗЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА ГОРОДСКИХ ЗЕМЕЛЬ

© 2025 г. А. В. Захарченко^{1,*}, А. А. Тигеев¹, О. А. Пасько²

¹Тюменский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук, Тюмень, Россия

²Национальный открытый институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: avzakh@gmail.com

Поступила в редакцию 13.12.2024 г.

После доработки 20.01.2025 г.

Принята к публикации 18.04.2025 г.

Цель работы – решение проблемы отсутствия доказательной базы определения точек исследования как фоновых. Предложена схема, независимая от наблюдателя, позволяющая определить фоновые значения содержания микроэлементов в твёрдой фазе снежного покрова. Применяется следующий ряд: преобразование исходных данных в относительные величины; иерархический кластерный анализ; вычисление средних значений по всем кластерам и химическим элементам; выбор кластера с наименьшими значениями, точки которого принимается за фон.

Ключевые слова: иерархический кластерный анализ, микроэлементы, снеговая пыль, классификация

DOI: 10.31857/S2076673425020054, **EDN:** FPNITV

ВВЕДЕНИЕ

Темпы роста промышленности Тюменской области высоки и сопровождаются увеличением выбросов в атмосферу загрязняющих веществ. Это особенно актуально в связи с увеличением в атмосферном воздухе твёрдых частиц РМ-2.5/РМ-10, содержащих высокие концентрации тяжёлых металлов. Направление движения областей пониженного давления, их сочетания с областями повышенного барического давления, изменение треков перемещения может существенно повлиять на качество воздуха отдельных территорий. С другой стороны, сами территории могут оказаться источниками загрязнения атмосферного воздуха. Атмосферные осадки, например, снег, вымывают из атмосферы твёрдую фазу частиц, что используется для оценки их содержания в атмосферном воздухе по их содержанию в снежном покрове. Снежный покров служит индикатором состояния атмосферного воздуха в системе санитарно-экологического мониторинга (Сергеева, Куимова, 2016).

Для снежного покрова отсутствует ПДК загрязняющих веществ. Оценки загрязнения талой

воды и твёрдой фазы проводятся на основе коэффициента концентрации, как отношение их содержания в объекте к фоновым значениям. Из этого вытекают проблемы: что считать фоновыми наблюдениями; следует ли доказывать это свойство в случае серии проведённых наблюдений; какие методы его выявления использовать, если надо сделать выбор независимо от наблюдателя?

Определение фонового содержания микроэлементов, депонированных в природных объектах: гумусовом горизонте почв, торфе, донных отложениях рек и озёр, снежном покрове вытекает из прикладных исследований (РД 52.18.769-2012), необходимых для определения и оценки загрязнения территории веществами в результате деятельности опасных производственных объектов. Положение в пространстве фоновых точек наблюдения и состав веществ представляют важное условие понимания геохимической обстановки в регионе (Anderson, Kravitz, 2010). Фоновое содержание веществ (С) – это начальный уровень, от которого следует производить отсчёт загрязнения окружающей воздушной среды (Селезнева

и др., 1979). Например, в районах Томской области выделяются локальные геохимические особенности территорий ($C_{\text{лок}}$), в дополнение к фоновым значениям (Таловская и др., 2014). Каждое измерение C складывается из фонового $C_{\text{ф}}$ и локального дополнения $C_{\text{лок}}$ (Селезнева и др., 1979):

$$C = C_{\text{ф}} + C_{\text{лок}}, \quad (1)$$

где $C > C_{\text{ф}}$, тогда тем ближе к фоновым будет не среднее значение, а минимальное: $C_{\text{мин}} \rightarrow C_{\text{ф}}$. Следовательно, фоновое значение – это начальный уровень отчёта, отклонение от которого в сторону увеличения указывает на загрязнение природной среды. Фоновый уровень содержания вещества складывается из естественных процессов, формирующих депонирующую среду, которые суммируются региональными особенностями. Фоновую концентрацию можно представить как сумму широтной зависимости ($C_{\text{ш}}$) и случайную ($C_{\text{сл}}$), обусловленную дальним переносом:

$$C_{\text{ф}} = C_{\text{ш}} + C_{\text{сл}}.$$

Формирование вещественного состава снежного покрова существенно отличается от атмосферных осадков летнего периода, который в основном определяется его содержанием в толще от земной поверхности до облачных слоёв (Селезнева и др., 1979). Однако в северных районах этот вклад составляет 35–40%, тогда как на юге ЕТС – 70–80%.

Изучение твёрдой фазы снежного покрова в зависимости от широты отбора пробы показало снижение общей минерализации, электропроводности с юга на север (Ермолов и др., 2014). Для группы элементов Fe, K, Zn отмечается существенное снижение их концентрации в твёрдой фазе снега с юга на север с минимумом в средней тайге. Для другой группы Ca, Mg, Cd, Mn снижение может достигать трёх раз. Наблюдаемый эффект объясняется ослаблением географической миграции почвенных частиц в составе твёрдой фазы снега. В лесной зоне относительно степной увеличивается влагозапас снежного покрова, что приводит к разбавлению и снижению концентрации пыли. Отмечается отсутствие изменения концентрации с широтой для Na, Sr, Cu, Ni. Таким образом, в случае фоновых наблюдений не все элементы твёрдой фазы снега оказываются широтно зависимыми. На профиле длиной 1700 км от южной тайги до тундры минеральный состав твёрдой фазы снега существенно изменяется с широтой

в сторону снижения содержания микроэлементов (Shevchenko et al., 2017).

Следовательно, в случае серии наблюдений необходимо выделять местный геохимический фон и подводить под него доказательную статистическую базу. Пространственная локализация имеет не только причинно-следственную компоненту, обусловленную широтной зависимостью содержания микроэлементов твёрдой фазы снега, но и дополняется случайными ландшафтными процессами перераспределения поступающих в атмосферу веществ, в том числе и загрязняющих. Это утверждение обусловлено также их зависимостью от случайного распределения местоположения депонирующей среды относительно факторов загрязнения и условий формирования атмосферного загрязнения в связи с движением зон повышенного и пониженного атмосферного давления (Захарченко и др., 2020). Метеорологические данные указывают на присутствие барического градиента, вызывающего развитие стойкого юго-западного переноса воздушных масс. Показано, что движения атмосферных циклонов доставляет загрязняющие вещества на территории, где отсутствуют источники их загрязнения, например, таёжные леса Дальнего Востока (Кондратьев, 2008). Отмечается возможность трансграничного переноса загрязнителей из Восточно-Казахстанской области на территорию Горного Алтая (Робертус и др., 2016). Проблемы выделения фоновых участков также видятся в сложности локализации загрязняющих веществ по территориальному положению источника их поступления в атмосферу, отсутствии характеристик выброса, таких как концентрация, температура, давление, диаметр устья и высота трубы над земной поверхностью.

Цель работы – показать возможности иерархического кластерного анализа для выявления фоновых точек наблюдения, неподверженных антропогенному загрязнению микроэлементами твёрдой фазы снежного покрова. Проблема заключается в том, что выбор фоновых мест отбора проб произволен. В качестве фонового значения рассчитывается среднее для точек, удалённых от источника выброса загрязняющих веществ. Это правило для фоновых исследований согласуется с нормативами в случае сухого вымывания пыли из атмосферы при планировании точек наблюдения вблизи источника выброса. В случае мокрого вымывания твёрдой фазы источники загрязнения веществами переносятся за счёт циклональной деятельности, как на глобальном, так и на региональном уровнях

(Захарченко и др., 2020). Такой перенос загрязняющих веществ приводит к тому, что их повышенное содержание обнаруживается в области точек наблюдения, удалённых от регионального источника, что существенно снижает возможности выявления загрязнённых территорий. С другой стороны, на территориях вблизи источников загрязнения случайно формируются уникальные местоположения, где обнаруживаются содержания загрязняющих веществ ниже значений точек отбора проб, удалённых от города. В результате усреднения имеем завышенную оценку содержания веществ на удалении от источника загрязнения, которые отнесены к фоновым концентрациям, и заниженную вблизи от него. Впоследствии занижается коэффициент концентрации и, соответственно, экологическая опасность городских и промышленных территорий, что произошло относительно оценки экологической опасности в Тобольске (Московченко и др., 2021а).

Кластерный анализ широко используется для анализа микроэлементов твёрдой фазы снежного покрова, но чаще с геохимической точки зрения (Московченко и др., 2021а, Shevchenko, 2017). Его использование для сортировки локаций отбора проб по содержанию химических элементов применяется в гидрологии (Hossain et al., 2013; El-Dars, Sami, 2020; Liu Honghua et al., 2021).

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обоснование выделения точек фонового наблюдения проведено на данных микроэлементного состава снеговой пыли Тюмени (57°15' с.ш., 65°54' в.д.). Региональные источники пыли представляют автотранспорт, предприятия, производящие нефтегазовое оборудование, аккумуляторный завод, а также неспециализированные источники – две ТЭЦ (Московченко, 2021б).

Обор проб снега проведён стандартным снегомером на всю глубину слоя снега. Для оценки содержания пыли составляли сборную пробу из 3–5 образцов в зависимости от мощности слоя снега. Все пробы снега отобраны в 2020 г.: в Тюмени – 61 проба. Отделение твёрдой фракции проводилось фильтрацией через беззольные нитроцеллюлозные фильтры “Millipore” с диаметром пор 0.45 мкм. Для получения достаточного количества твёрдого осадка фильтровали 1.5–2 л талой воды. После высушивания фильтров при $t = 95^\circ\text{C}$ их взвешивали для определения массы пыли с расчётом её содержания в литре талой воды (г/л).

В аналитическом сертификационном испытательном центре ИПТМ РАН (г. Черноголовка, Московская область) определён элементный химический состав твёрдофазных выпадений (51 элемент) с использованием атомно-адсорбционного спектрофотометра. В статистическом иерархическом кластерном анализе использованы 24 микроэлемента: Li, Sc, V, Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, Sn, Sb, Cs, W, Ba, Pb. В них наименьшее количество отсутствующих значений содержания. Отсутствующие заменены средними значениями.

Местоположение точек наблюдения выбиралось случайным образом. Априори фоновыми наблюдениями считались точки (101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111), удалённые более 10 км от городской черты. Вероятностно-статистический подход применяют при отсутствии видимых границ импактного воздействия и ожидаемых географических закономерностей, что делает его объективным для оценки экологической опасности городских земель. При этом территория покрывается сеткой, а выбор ячейки для наблюдения проводят случайным способом.

Содержания химических элементов в геохимическом спектре могут различаться на порядки и существенно отклоняться от нормального распределения, что делает некорректным их сравнение в едином статистическом комплексе без предварительной стандартизации. Значения центрированы относительно медианы и соотношены с расстоянием между квантилями:

$$S_{\text{median}}_{ij} = \frac{x_{ij} - \text{median}_j}{\text{Quantile } 75 - \text{Quantile } 25}, \quad (2)$$

где S_{median}_{ij} – стандартизованные значения относительно медианы, нормированные на разницу между квантилями, x_{ij} – значение содержания элемента в точке наблюдения, median_j – медиана по j -тому элементу, $\text{Quantile } 75$ – квантиль 75% выборки, $\text{Quantile } 25$ – квантиль 25%, которые изменяются от отрицательных до положительных значений.

Существуют два метода выбора мест расположения точек наблюдения: 1) место выбирает исследователь (импактный, маршрутный, стационарный методы), что вводит субъект как дополнительный фактор в схему наблюдения; 2) расположение точек определяется случайным образом, что исключает влияние исследователя на результат. Мы использовали вероятностно-статистический подход в определении как загрязнённых, так и фоновых точек наблюдения.

Иерархический кластерный анализ (далее – ИКА) используется для разделения на группы геохимических данных. Для каждого кластера по выделенным точкам наблюдения рассчитывались средние значения содержания микроэлемента. Кластер, где наблюдаются их наименьшие значения, считается фоновым. В экологических оценках загрязнения территорий химическими веществами присутствует коэффициент концентрации как отношение определённого значения $K_c = (C_i/C_\phi)$ содержания вещества в природной среде к его фоновому содержанию, где C_i – содержание микроэлемента в среде, C_ϕ – его фоновое содержание. Это соотношение служит основой большинства формул при определении степени загрязнения территорий тяжёлыми металлами и оценкой их экологической опасности для здоровья людей этого загрязнения (Moskovchenko et al., 2021). Интегральный показатель загрязнения микроэлементами (Z_c) определяется по формуле (Касимов и др., 2012):

$$Z_c = \sum_{j=1}^n Kc_{ij} - (n-1), \quad (3)$$

где Kc_{ij} – коэффициент загрязнения, представляющий безразмерную величину, n – число учитываемых элементов с $Kc > 1.5$.

При оценке загрязнения снежного покрова показатель Z_c считается низким при значении < 32 ; средним и умеренно опасным – $32-64$; высоким и опасным – $64-128$; очень высоким и опасным – $128-256$. Чрезвычайно опасный уровень имеет значение более 256.

Для выявления фоновых наблюдений наиболее оптимально использовать иерархический кластерный анализ (далее – ИКА), позволяющий разделить наблюдения на кластеры. ИКА и геоинформационный анализы проводились с помощью программы Orange с пакетом Geo. Пакет Geo по данным GPS позволяет сразу же визуализировать положение кластеров на местности относительно источников загрязнения атмосферного воздуха. Расчёт расстояния между точками наблюдения проводился методом Euclidian, построение диаграммы проведено методом Ward. Для каждой точки наблюдения обозначен номер кластера, что позволяет сделать обратный переход от стандартизованных взвешенных значений к номинальным (мг/кг). Для всех элементов рассчитаны средние значения его содержания в кластере.

Если выбор точек для отбора проб изучаемой территории проводился случайным образом, то

высока вероятность, что будут выявлены точки с наименьшим загрязнением веществами, что будет выделено специальной группой. В серии наблюдений, например, внутри городской черты, ИКА позволит выделить кластер с наименьшим содержанием микроэлементов. Эти точки можно принять за фоновые и относительно них оценивать загрязнения атмосферного воздуха, выбрасываемые производственными объектами. Для всех элементов точек наблюдения внутри кластеров рассчитываются средние значения исходного содержания.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

Следуя общепринятому мнению, предполагалось, что точки, удалённые на десятки километров от городской черты, не подвержены влиянию выбросов в атмосферу, обусловленных городскими источниками. Пробы отбирались на удалении от автострад (более 100 м). Использовались лесные земли и сельскохозяйственные угодья (рис. 1). Считалось, что микроэлементный состав твёрдой фазы снежного покрова будет отражать естественные условия его формирования, не испытывающие влияния антропогенного фактора (промышленность, жилые районы, автотранспорт). Ожидалось, что с помощью ИКА будет получено доказательство этого предположения.

По результатам анализа в пределах фоновых точек выделились уникальные наблюдения кластера С3 (102, 103, 105), которые не встречаются внутри городской черты. Обнаружилось, что точки 101, 106, 107, 111, принадлежащие кластеру С2, схожи с наблюдениями внутри городской черты 1, 5, 8, 13, 35. Если считать этот кластер фоновым, то внутри городской черты точки кластера встречаются на юге, юго-западе и в центре города. Можно предположить, что в городской застройке могут создаваться условия формирования снежного покрова, схожие с условиями на лесных землях и сельскохозяйственных угодьях. Эти районы можно считать условно экологически неопасными. В селитебной зоне Тюмени условно чистых точек оказалось пять (кластер 2) из 50 (10%) (см. рис. 1). С другой стороны, из десяти проб, отобранных на удалении от города, одна проба (кластер 1) оказалась достаточно загрязнённой (10%). В зависимости от содержания микроэлементов в пыли снега эти 10% могут оказать существенное влияние на конечные выводы исследователя.

В северной части города большое количество точек относится к кластеру С5, который отражает промышленное загрязнение атмосферы. В кластере С4 всего одна точка наблюдения (40). Её уникальность определяется высоким содержанием свинца, вызванным соседством с Тюменским аккумуляторным заводом. Кластер С1 представляет переходный вариант, в котором содержание тяжёлых металлов меньше, чем С5, но существенно больше по отношению к фоновым наблюдениям. Тяготеют точки к западу и юго-западу. Чтобы сравнить геохимические спектры кластеров, рассчитаны их средние содержания для микроэлементов (табл. 1).

Точки кластера С2 и С3 содержат пониженное количество микроэлементов относительно остальных трёх кластеров. Точки кластерам С3 отличаются повышенным содержанием серебра и олова по сравнению с другими фоновыми наблюдениями, хотя содержание V, Cr, Co, Ni, Zn наименьшее в сравнении с другими кластерами. Присутствие повышенного содержания Ag в точках фонового наблюдения нельзя объяснить источниками промышленных предприятий Тюмени. Повышенное присутствие Ag и Sn объясняется лесными пожарами, хотя в зимний период пожарную активность, превышающую ветровую эрозию, невозможно найти в природе (Московченко и др., 2021б). Феномен требует дополнительных исследований, более вероятен дальний циклональный перенос из промышленных регионов Урала. Учитывая низкое содержание тяжёлых металлов, этот кластер можно принять за фоновый, заменяя высокие значения содержания Ag и Sn в С1 из кластера С2 (табл. 2). Кластеры С1, С4, С5 имеют высокое содержание тяжёлых металлов относительно фоновых кластеров, что указывает на загрязнение снежного покрова территорий, где они концентрируются.

В табл. 2 фоновые значения содержания микроэлементов в твёрдой фазе снежного покрова, выделенные с помощью кластерного анализа, значительно меньше, чем усреднённые значения, используемые как средние значения или геометрические средние по всем точкам, удалённым от черты города (Московченко и др., 2021а). Фоновые значения ИКА ближе по величине к минимальным значениям, что вытекает из формулы (1). Встаёт вопрос – какие значения принять за фоновые? Если мысленно убрать фактор загрязнения атмосферы городов Тюмень и Тобольск, то фоновые значения, полученные в результате ИКА, приближаются

к естественным условиям формирования микроэлементарного состава твёрдой фазы снега без антропогенного фактора влияния (или с малым его присутствием). Что, собственно, является основным условием выделения фоновых значений и фоновых точек наблюдения. Промышленные предприятия на источники выброса ставят высокие трубы, чтобы снизить воздействие выбросов загрязняющих веществ на окружающее пространство, тем самым повышается антропогенная нагрузка на земли, удалённые от городской черты. Так, в г. Тобольске (Московченко и др., 2021а) фоновые значения содержания микроэлементов превышают таковые в городской черте. Часто встречаются в жилых застройках участки, имеющие меньшее содержание тяжёлых металлов, чем в лесных землях и сельскохозяйственных угодьях. Наименьшие значения имеет фоновое по Западной Сибири (Ермолов и др., 2014). Оно согласуется с минимальными концентрациями, которые наблюдаются в Тюмени (Московченко и др., 2021б). Максимально высокие содержания загрязняющих веществ относительно других регионов приводится в качестве фоновых в Томской области (Таловская, 2014). С фоновыми кластерными значениями содержания тяжёлых металлов в Тюмени согласуются приведённые данные их фоновых значений, выявленные в г. Чите (Бондаревич, 2019). Анализ таблицы 2 приводит к заключению, что авторы, не прибегая к обоснованию, выбирают наиболее удобные фоновые значения загрязняющих веществ. Отмечено, что используя фактор удаления от города как основное условие фонового участка, можно совершить ошибку и априори принять загрязнённые точки наблюдения за участки без антропогенного влияния. Полученные данные кластеров (см. табл. 1) пересчитаны с использованием фоновых ИКА и ранее опубликованных. Рассчитаны коэффициенты концентрации (K_c) и интегральные показатели загрязнения (Z_c) (табл. 3).

Точки кластера С1 имеют очень высокий уровень экологической опасности, кластеры С4 и С5 – максимально высокий. Если использовать предложенные фоновые значения, то в Тюмени кластер С1 имеет уровень экологически неопасный, С3 – либо нулевую опасность, либо умеренно опасный. Использование фоновых значений Тобольска приводит к выводу о нулевой или очень низкой опасности загрязнения атмосферного воздуха Тюмени. Возникает неопределённость территориальной оценки. Чтобы

избежать неоднозначности экологических рисков, необходимо пользоваться алгоритмом выделения фоновых наблюдений независимым от исследователя.

Объективная независимая от наблюдателя схема определения фоновых точек наблюдения может быть построена на выявлении минимальных значений содержания микроэлементов, согласно тому, что они отражают естественный

процесс формирования твёрдой фазы снежного покрова (1). Предварительно следует перейти от абсолютных значений к относительным (рис. 2). В данном исследовании исходные данные содержания микроэлементов нормированы относительно медианы и соотнесены с квантилями 25 и 75% (2). Каждая точка в анализе представляется как многомерный вектор, отражающий геохимический спектр. Следующий шаг – ИКА

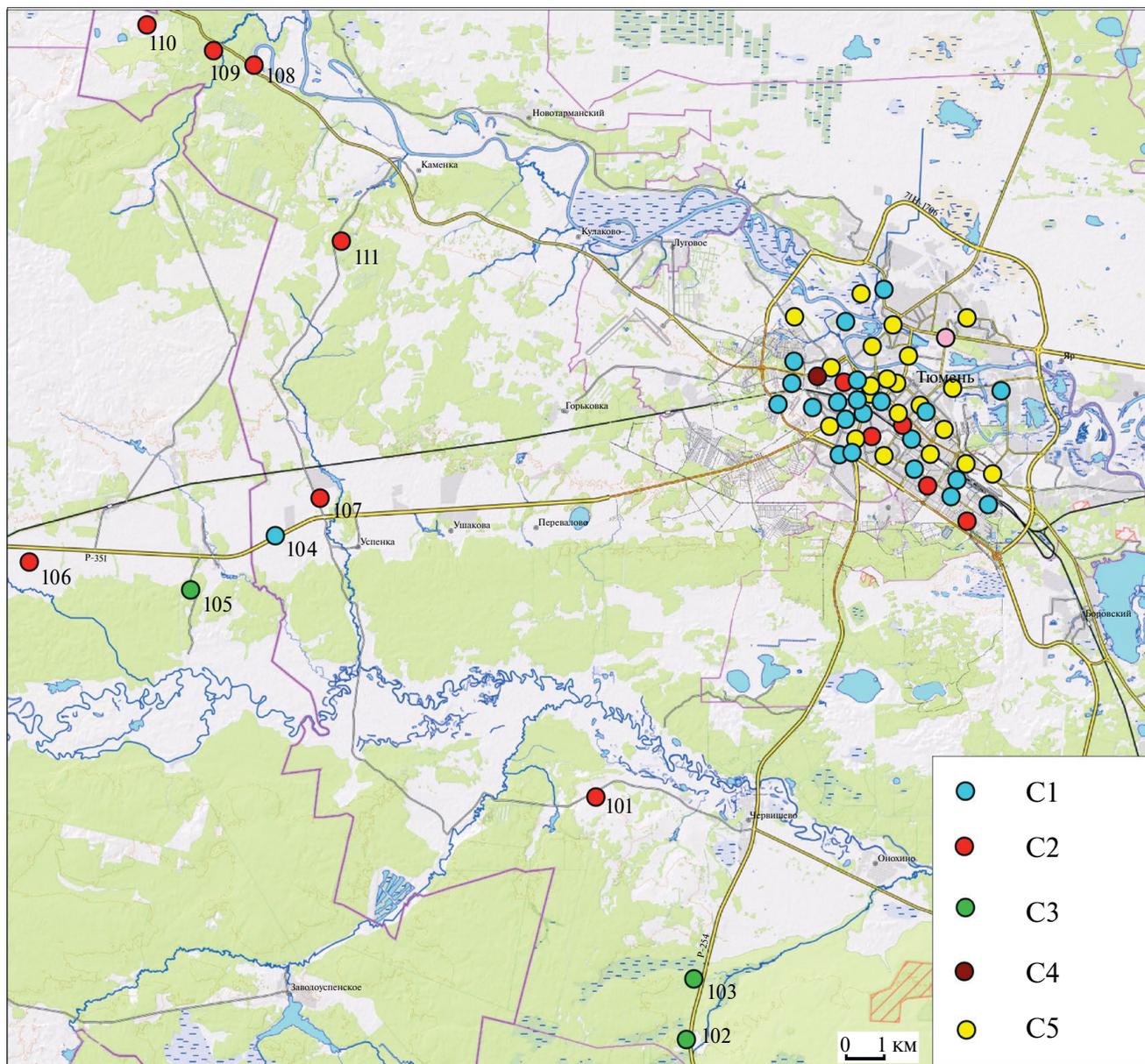


Рис. 1. Расположения точек наблюдения и результаты иерархического кластерного анализа (С1–С5). Точки 101–111 рассматривались как фоновые, точки 1–100 – в зоне влияния городских источников загрязнения

Fig. 1. The locations of observation points and the results of hierarchical cluster analysis (C1–C5). Points 101–111 were considered as background points, 1–100 – the zone of influence of urban pollution sources

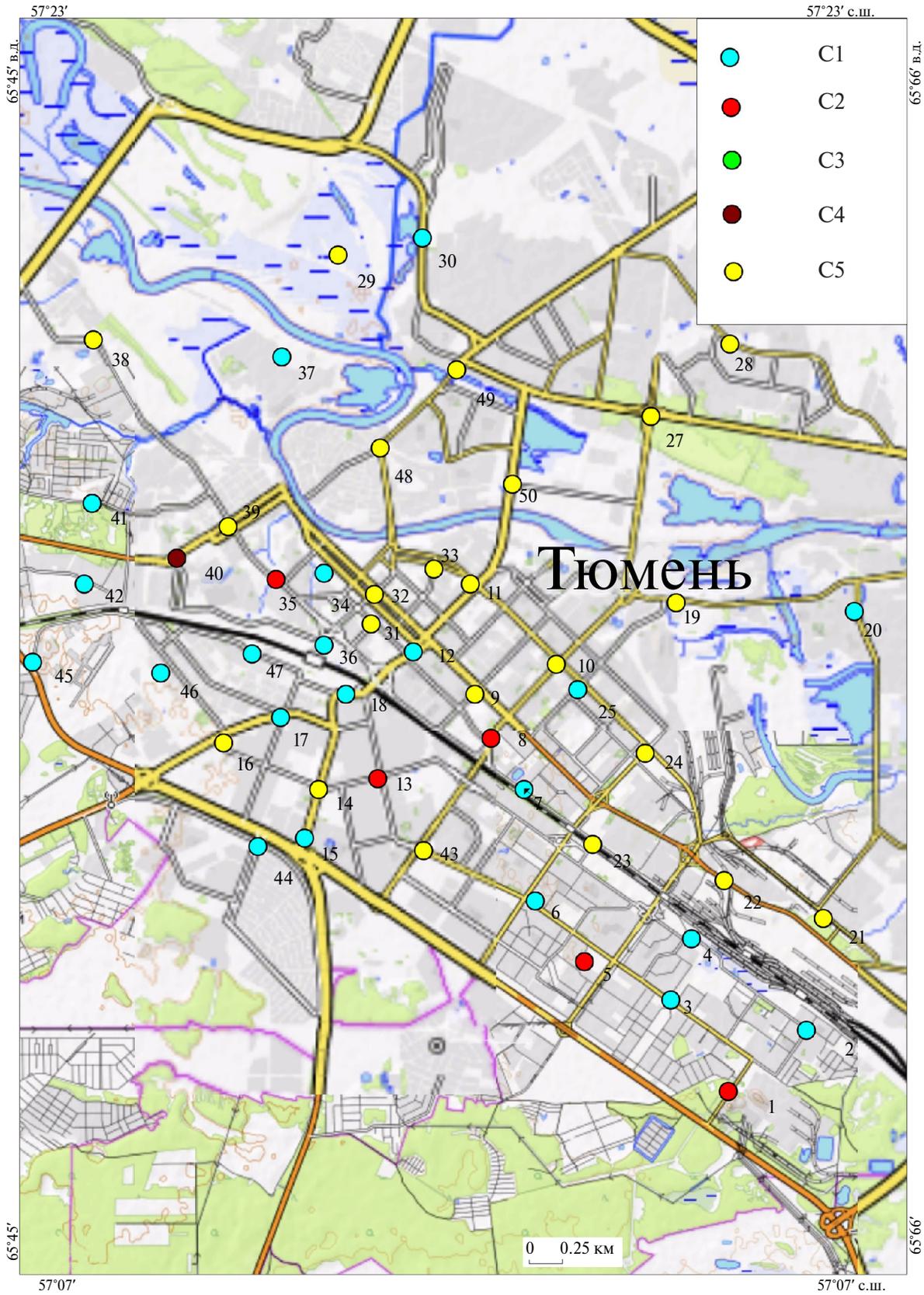


Рис. 1. Продолжение
 Fig. 1. Continued

Таблица 1. Среднее содержание микроэлементов (мг/кг) твёрдой фазы снега в кластерах C1–C5

Микроэлементы	Кластеры				
	C1	C2	C3	C4	C5
Li	2.38	0.43	0.39	2.89	4.66
Sc	2.90	0.37	0.29	2.89	5.95
V	19.19	4.75	2.56	19.78	36.59
Cr	218.66	26.48	10.60	189.74	420.99
Co	14.44	1.22	0.40	13.18	28.77
Ni	258.91	25.07	4.95	211.67	476.57
Cu	68.60	11.54	10.82	91.64	151.86
Zn	209.74	47.22	21.60	243.70	371.26
Ga	1.42	0.31	0.27	1.82	2.62
As	3.44	1.06	0.70	6.13	5.48
Rb	3.74	0.83	0.70	6.07	7.29
Sr	22.63	3.32	2.77	28.82	40.60
Y	1.82	0.32	0.28	2.57	3.64
Zr	13.43	2.35	2.07	20.58	26.22
Nb	1.05	0.27	0.25	1.57	2.23
Mo	1.21	0.36	0.40	2.21	2.66
Ag	0.18	0.15	0.62	0.36	0.21
Cd	0.40	0.08	0.08	0.55	0.61
Sn	4.76	1.17	6.68	9.22	9.08
Sb	3.81	0.43	0.24	8.08	8.09
Cs	0.26	0.06	0.07	0.43	0.48
Ba	63.95	8.94	6.16	143.02	158.68
W	3.31	4.27	5.03	4.87	5.04
Pb	51.53	8.01	7.86	598.91	80.18

сортирует точки, объединяя сходные по величине и форме геохимического спектра в структуру кластеров. Переходим к исходным данным и рассчитываем средние значения для каждого кластера по каждому микроэлементу для всех точек наблюдения. Выделяем кластеры, в которых значения содержания микроэлементов наименьшии. Их представляем как фоновые, а точки, входящие в них, считаем фоновыми наблюдениями. В дальнейшем эти точки используются для оценки загрязнения атмосферного воздуха (3). Такой подход к анализу наблюдений даёт возможность получить непредвзятую оценку экологической опасности загрязнения атмосферного воздуха в городской среде и на промышленных предприятиях.

ВЫВОДЫ

Проблема фоновых наблюдений касается отбора проб почв, воды и донных отложений. Её суть в том, что авторы исследования определяют фоновые точки априори. Метод иерархического кластерного анализа позволяет объективно выделять фоновые точки наблюдения и соответственно коэффициент концентрации. Тем самым, экологические службы предприятия получают возможность объективно оценить экологическую опасность от загрязнения окружающей среды.

Предложена схема проведения объективной и независимой от наблюдателя оценки фонового содержания микроэлементов твёрдой фазы

Таблица 2. Фоновые значения содержания микроэлементов (мкг/кг) в твёрдой фазе снегового покрова исходя из кластерного анализа и данные (Ермолов и др., 2014; Таловская, 2014; Московченко и др., 2021а; Московченко и др., 2021б)

Микро-элементы	Фоновые кластерный	Фоновые Тюмень (Московченко, 2021а)		Фон, Тобольск (Московченко и др., 2021б)		Фоновые (Ермолов и др., 2014)		Фоновые Томск (Таловская, 2014)
	Среднее	Среднее	Мин	Среднее	Мин	Медиана	Мин	
Li	0.41	3.3	0.4	3.3	1.8	0.02	0.002	–
Sc	0.33	2.3	0.6	1.2	0.7			7.1
V	3.66	27.5	1.6	37	20			–
Cr	18.54	124	19.3	145	76			110
Co	0.81	5.8	0.8	5.0	1.8			10.3
Ni	15.01	95.9	17.2	120	54	0.5	<0.1	–
Cu	11.18	64.9	9.5	52	30	1.0	0.5	–
Zn	34.41	262	55.0	236	176	2.2	0.9	–
Ga	0.29	2.4	0.1	2.7	1.3			–
As	0.88	9.6	0.2	5.3	0.7			0.5
Rb	–	–	–	7.9	4.1			55
Sr	3.04	1.49	4.4	24.6	13.2	2.30	0.55	100
Y	0.30	2.6	0.3	2.5	1.3			–
Zr	2.21	17.5	4.6	18.0	9.8			–
Nb	0.26	2.1	0.5	2.1	1.4			–
Mo	0.38	2.6	1.0	2.8	2.2			–
Ag	–	–	–	1.9	1.2			–
Cd	0.08	0.3	0.2	0.56	0.3	0.04	0.01	–
Sn	3.93	23.8	3.0	22.6	8.0			–
Sb	0.33	2	0.3	2.7	1.5			2.3
Cs	–	–	–	0.4	0.2			3.5
Ba	7.55	51.7	5.6	67	32			100
W	4.65	1.4	0.1	1.21	0.25			–
Pb	7.94	50.6	5.0	83.7	30.2	1.0	<0.1	–

Таблица 3. Коэффициент контаминации и интегральный показатель загрязнения Z_c (3) для кластеров С1–С5, с использованием фоновых значений по Тюмени (Московченко, 2021а) и по Тобольску (Московченко и др., 2021б)

Кластеры	Иерархический кластерный анализ		Тюмень (Московченко, 2021а)		Тобольск (Московченко и др., 2021б)	
	K_c	Z_c	K_c	Z_c	K_c	Z_c
С1	155.0	132	35.03	12.03	11.7	0.0
С2	3.2	0	7.39	0.00	3.5	0.0
С3	3.2	0	9.23	0.00	4.2	0.0
С4	361.2	338.2	63.79	40.79	24.9	1.9
С5	463.1	440.1	75.78	52.78	33.3	10.3



Рис. 2. Схема последовательности действий для выбора фоновых наблюдений и оценки уровня опасности загрязнения среды

Fig. 2. The scheme of the sequence of actions for selecting background observations and assessing the level of environmental pollution hazard

снежного покрова. Использование необоснованного фоновое содержание загрязняющих веществ приводит к занижению или завышению экологической опасности загрязнения атмосферного воздуха территории города.

Благодарности и финансирование. Государственное задание Министерства науки и высшего образования РФ (№ FWRZ-2021-0006).

Funding and acknowledgements. State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (No. FWRZ-2021-0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бондаревич Е.А. Оценка техногенного загрязнения городской среды Читы по состоянию снежного

покрова // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 3. С. 389–400. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-393>

Ермолов Ю.В., Махатков И.Д., Худяев С.А. Фоновые концентрации химических элементов в снежном покрове центрального сектора Западной Сибири // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 9. С. 790–800.

Захарченко А.В., Тигеев А.А., Пасько О.А., Колесниченко Л.Г., Московченко Д.В. Трансграничный, региональный и локальный геохимический перенос веществ в снеговом покрове // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2020. № 6. С. 31–42. <https://doi.org/10.31857/S0869780920060119>

Касимов Н.С., Кошелева Н.Е., Власов Д.В., Терская Е.В. Геохимия снежного покрова в восточном округе

- Москвы // Вестник МГУ. Сер. 5: География. 2012. № 4. С. 14–24.
- 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.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Курчатова А.Н., Тимшанов Р.И.* Геохимическая характеристика снежного покрова Тюмени // Вестник МГУ. Сер. 5: География. 2021а. № 3. С. 13–26.
- Московченко Д.В., Пожитков Р.Ю., Соромотин А.В.* Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021б. Т. 332. № 5. С. 156–169.
- РД 52.18.769-2012. Порядок определения исходного фоновое содержания загрязняющих веществ в компонентах природной среды в районах расположения опасных производственных объектов. Обнинск: ФГБУ ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 65 с.
- Робертус Ю.В., Удачин В.Н., Рихванов Л.П., Кивацкая А.В., Любимов Р.В., Юсупов Д.В.* Индикация компонентами природной среды трансграничного переноса загрязняющих веществ на территорию Горного Алтая // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 9. С. 39–48.
- Селезнева Е.С., Зайцев А.С., Русина Е.Н., Шварц Я.М., Петренчук О.П.* О критериях выбора и рекомендациях по местоположению станций мониторинга фоновое загрязнения атмосферы. Мониторинг фоновое загрязнения атмосферы / Под ред. А.С. Зайцева // Тр. Главной геофизической обсерватории Л.: Гидрометеиздат, 1979. 132 с.
- Сергеева А.Г., Куимова Н.Г.* Снежный покров как индикатор состояния атмосферного воздуха в системе санитарно-экологического мониторинга // Бюлл. патологии и физиологии. 2011. № 40. С. 100–104.
- Таловская А.В., Язиков Е.Г., Филимоненко Е.А.* Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снежного покрова // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2014. № 5. С. 408–417.
- Anderson R.H., Kravitz M.J.* Evaluation of geochemical associations as a screening tool for identifying anthropogenic trace metal contamination // Environ. Monit. Assess. 2010. 167. P. 631–641.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-1079-2>
- El-Dars F.S., Sami H.M.* Interpretation of hydrogeochemical data using Hierarchical Cluster Analysis: A case study at Wadi El-Natron, Egypt // Journ. of African Earth Sciences. 2020. № 170. 103930. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103930>
- Hossain M.G., Reza A.S., Lutfun-Nessa M., Ahmed S.S.* Factor and Cluster Analysis of Water Quality Data of the Groundwater Wells of Kushtia, Bangladesh: Implication for Arsenic Enrichment and Mobilization // Journ. of Geological Society of India. March 2013. V. 81. P. 377–384.
- Liu H., Yang J., Ye M., James S.C., Tang Zh., Dong J., Xing T.* Using *t*-distributed Stochastic Neighbor Embedding (*t*-SNE) for cluster analysis and spatial zone delineation of groundwater geochemistry data // Journ. of Hydrology. 2021. V. 597. P. 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126146>
- 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. V. 11. № 71. 709.
<https://doi.org/10.3390/min11070709>
- Shevchenko V.P., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Krickov I.V., Manasyrov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Y., Shirokova L.S., Kolesnichenko L.G., Zemtsov V.A., Kirpotin S.N.* Impact of snow deposition on major and trace element concentrations // Hydrology of Earth System. Science. 2017. № 21. P. 5725–5746.

Citation: *Zakharchenko A.V., Tigeev A.A., Pas'ko O.A. On background observations of the content of trace elements in the solid phase of the snow cover of urban lands. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2025, 65 (2): 255–267. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425020054*

On Background Observations of the Content of Trace Elements in the Solid Phase of the Snow Cover of Urban Lands

© 2025 A. V. Zakharchenko^{a, #}, A. A. Tigeev^a, O. A. Pas'ko^b

^a*Tyumen Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tyumen Scientific Centre SB RAS), Tyumen, Russia*

^b*National Open Institute, St. Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: avzakh@gmail.com*

Received December 13, 2024; Revised January 20, 2025; Accepted April 18, 2025

The problem of background observations is seen in the fact that there are no justifications independent of the researcher for choosing suitable observation points. The high pipes of the emission source allow pollutants to be scattered over long distances, creating a wind shadow near it with a low flow of dust and scattered substances. The points directly adjacent to the source of the emission of pollutants sometimes turn out to have a lower content compared to the remote ones. Therefore, the distance from the source of the emission is not a guarantee of the absence of anthropogenic influence, i.e. natural conditions for the formation of the microelement composition of snow cover dust. As a result, it turns out that the choice of a priori points remote from the urban area in forests and on agricultural land cannot undoubtedly be considered background. Averaging values at such points can lead to the fact that the content of pollutants in them will be higher than at points located in the zone of direct influence of the anthropogenic factor. The choice of background points is made by the authors of studies without an evidence base, which leads to an underestimation or overestimation of the environmental hazard of industrial emissions. Using the example of Tyumen, an algorithm for selecting background observation points, regardless of the observer, is proposed. The territory of the city is divided into squares, and the location of observation points is made randomly. Next, a chain is used: converting the initial data into relative values, hierarchical cluster analysis, calculating the average values of the content of trace elements for all clusters and chemical elements, selecting the cluster with the lowest values, the points of which are taken as the background. The same algorithm can be used for any depositing media: soil, sediments, peat bogs, etc.

Keywords: hierarchical cluster analysis, trace elements, snow dust, classification

REFERENCES

- Bondarevich E.A.* Assessment of technogenic pollution of the urban environment in Chita by the snow cover state. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019, 59 (3): 389–400. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-3-393> [In Russian].
- Ermolov Yu.V., Makhatkov I.D., Khudyayev S.A.* Background concentration of chemical elements in snow cover of the typical regions of the Western Siberia. *Optika Atmosfery i Okeana. Optics of the Atmosphere and Ocean*. 2014, 27: 790–800 [In Russian].
- Zakharchenko A.V., Tigeev A.A., Pas'ko O.A., Kolesnichenko L.G., Moskovchenko D.V.* Transboundary, regional and local geochemical transfer of chemicals in snow cover. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya Geoecology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2020, 6: 41–53. <https://doi.org/10.31857/S0869780920060119> [In Russian].
- Kasimov N.S., Kosheleva N.E., Vlasov D.V., Tverskaya E.V.* Geochemistry of snow cover in the Eastern district of Moscow. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya. Moscow University Bull. Series 5: Geography*. 2012, 4: 14–24 [In Russian].
- Kondrat'ev I.I.* Atmospheric transboundary transport of pollutants from the emission centers of East Asia to the south of the Far Eastern region of Russia. *Vestnik DVO RAN. Vestnik of the Far East Branch of the*

- Russian Academy of Sciences. 2008, 1: 107–112 [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Pojtkov R.Yu., Kurchatova A.N., Timsharov R.I.* Geochemistry of snow cover within the tyumen city. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5: Geografiya*. Moscow University Bull. Series 5: Geography. 2021a, 3: 13–26 [In Russian].
- Moskovchenko D.V., Pozhitkov R. Yu., Soromotin A.V.* Geochemical characteristics of snow cover in Tobolsk. *Vestnik Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Geoinzhiniring*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2021b, 332 (5): 156–169.
<https://doi.org/10.18799/24131830/2021/5/3195> [In Russian].
- RD 52.18.769-2012. *Poryadok opredeleniya iskhodnogo fонового soderzhaniya zagryaznyayushchikh veshchestv v komponentakh prirodnoi sredy v raionakh raspolozheniya opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov*. The procedure for determining the initial background content of pollutants in the components of the natural environment in areas of hazardous production facilities. Obninsk: FSBI RIHMI-WDC, 2012: 65 p. [In Russian].
- Robertus Yu.V., Udachin V.N., Rikhvanov L.P., Kivatskaya A.V., Lyubimov R.V., Yusupov D.V.* Indication by environmental components the pollutant transboundary transfer to Gorny Altai. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Georesursnyi inzhiniring*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2016, 327 (9): 39–48 [In Russian].
- Selezneva E.S., Zajcev A.S., Rusina E.N., Shvare Ya.M., Petrenchuk O.P.* O kriteriyah vybora i rekomendaciyah po mestopolozheniyu stancij monitoringa fonovogo zagryazneniya atmosfery. On selection criteria and recommendations for the placement of monitoring stations for background atmospheric pollution. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1979: 132 p. [In Russian].
- Sergeeva A.G., Kuimova N.G.* Snow cower as an indicator of the Atmospheric air condition in the system of sanitary ecological monitoring. *Byulleten' patologii i fiziologii*. Bulletin of Pathology and Physiology. 2011, 40: 100–104 [In Russian].
- Talovskaya A.V., Yazikov E.G., Filimonenko E.A.* Assessment of atmosphere pollution in urbanized areas of Tomsk region by the results of snow cover study. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya. Geocology. Engineering geology, hydrogeology, geocryology*. 2014, 5: 408–417 [In Russian].
- Anderson R.H., Kravitz M.J.* Evaluation of geochemical associations as a screening tool for identifying anthropogenic trace metal contamination. *Environ. Monit. Assess.* 2010, 167: 631–641.
<https://doi.org/10.1007/s10661-009-1079-2>
- El-Dars F.S., Sami H.M.* Interpretation of hydrogeochemical data using Hierarchical Cluster Analysis: A case study at Wadi El-Natron, Egypt. *Journ. of African Earth Sciences*. 2020, 103930: 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103930>
- Hossain M.G., Reza A.S., Lutfun-Nessa M., Ahmed S.S.* Factor and Cluster Analysis of Water Quality Data of the Groundwater Wells of Kushtia // *Journ. of Geological Society of India. Bangladesh: Implication for Arsenic Enrichment and Mobilization*. March 2013, 81: 377–384.
- Liu H., Yang J., Ye M., James S.C., Tang Zh., Dong J., Xing T.* Using *t*-distributed Stochastic Neighbor Embedding (*t*-SNE) for cluster analysis and spatial zone delineation of groundwater geochemistry data. *Journ. of Hydrology*. 2021, 597: 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126146>
- 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, 11 (71): 709.
<https://doi.org/10.3390/min11070709>
- Shevchenko V.P., Oleg S.P., Sergey N.V., Krickov I.V., Manasyov R.M., Politova N.V., Kopysov S.G., Dara O.M., Auda Yves, 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, 21: 5725–5746.
<https://doi.org/10.5194/hess-21-5725-2017>