

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

На правах рукописи

НОВИКОВА ВАЛЕРИЯ ДМИТРИЕВНА

**ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕРРИТОРИИ Г. КЕМЕРОВО
НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА**

Специальность 1.6.21. Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:
доктор геолого-минералогических наук,
доцент Таловская А.В.

Томск – 2025

Оглавление

Введение.....	4
Глава 1. Обзор исследований влияния объектов теплоэнергетики и коксохимии на окружающую среду.....	13
1.1 Характеристика производственной деятельности угольной теплоэнергетики и виды загрязняющих веществ.....	13
1.2 Характеристика производственного цикла коксохимического производства и виды загрязняющих веществ.....	18
1.3 Оценка загрязнения компонентов природной среды.....	22
Глава 2. Природно-климатическая и геоэкологическая характеристика г. Кемерово.....	29
2.1 Физико-географическая характеристика.....	29
2.2 Геолого-геоморфологическая характеристика.....	30
2.3 Климатическая характеристика.....	32
2.4 Гидрология района.....	34
2.5 Почвы района.....	34
2.6 Геоэкологическая характеристика г. Кемерово.....	35
Глава 3. Методика и методы исследования.....	48
3.1 Методика отбора и подготовки проб снежного покрова.....	48
3.2 Аналитические методы исследования.....	51
3.3 Обработка результатов исследования.....	59
Глава 4. Уровень пылевой нагрузки на территорию г. Кемерово по данным снеговой съемки.....	64
4.1 Пространственное распределение пылевой нагрузки на территории.....	64
4.2 Динамика пылевой нагрузки в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии.....	69
Глава 5. Эколого-геохимический анализ состояния территории г. Кемерово по данным изучения состава нерастворимой фракции снежного покрова.....	74
5.1 Геохимическая характеристика нерастворимой фракции снежного покрова...	74

5.2 Динамика химического состава нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства (2016- 2023 гг.).....	94
5.3 Химический состав снеготалой воды в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства.....	106
Глава 6. Минерально-вещественная характеристика нерастворимой фракции снежного покрова в окрестностях предприятий теплоэнергетики г. Кемерово...	111
Заключение.....	119
Список литературы.....	122

Введение

Актуальность исследования. Важной геоэкологической проблемой Кемеровской области, одного из основных угледобывающих и перерабатывающих регионов в стране, является высокий уровень загрязнения атмосферного воздуха (Дудкина, 2011; Журавлева, 2014; Ларин и др., 2017; Доклад ..., 2017; 2021; 2023; 2024). Угли содержат большой спектр химических элементов, включая редкоземельные и радиоактивные (Арбузов с соавторами, 2000; 2005; 2007; 2011; 2019; Юдович и Кетрис, 2005; 2009), которые в процессе сжигания и переработки угля поступают в атмосферный воздух в составе твердых выбросов, и могут оказывать негативное воздействие на здоровье человека (Ревич, 2006; Vig et al., 2023; Garcia et al., 2024; Ige et al., 2024).

В г. Кемерово, административном центре области, сосредоточены крупные предприятия угольной теплоэнергетики и химической промышленности (коксохимический завод, производящий металлургический кокс, производство азотных удобрений и гипохлорита кальция). По официальным данным в атмосферном воздухе города периодически наблюдаются превышения ПДК для взвешенных веществ (аэрозоли), бенз(а)пирена, фенола, аммиака, углерода (сажа) и других компонентов (Доклад ..., 2017; 2021; 2023; 2024).

Эколого-геохимическая оценка состояния окружающей среды на территории г. Кемерово выполнялась в отдельных районах города и в разные периоды, например, на основе изучения почв (Просяникова, 2005; Шульгин и др., 2017) лишайников (Баумгертнер, 2011; Романова, 2012; Kotov et al., 2021; Zinicovscaia et al., 2024), листьев тополя (Юсупов и др., 2021; Юсупов, 2022) и снежного покрова (Бояркина и др., 1993; Павлов и др., 2007; Рапута и др., 2008; 2011). В этой связи, актуальным является проведение эколого-геохимического анализа атмотехногенного загрязнения на всей территории г. Кемерово для получения новых данных о пространственном распределении пылевой нагрузки и химических элементов, включая малоизученные в геохимическом плане редкие элементы, с использованием снежного покрова как депонирующей среды. Важным также является определение геохимической специфики и масштабов воздействия

крупных промышленных предприятий на городскую среду на основе данных многолетнего мониторинга загрязнения снежного покрова.

Снежный покров применяется многими исследователями как эффективный инструмент для оценки уровня загрязнения окружающей среды, поскольку аккумулирует атмосферные примеси с комплексом химических элементов природного и антропогенного происхождения (Саэт и др., 1990; Бояркина и др., 1993; Касимов и др., 1995, 2012; 2016; Шевченко и др., 2006, 2015; Савичев, 2010; Язиков, 2006; Девятова, 2006; Таловская, 2008; 2022; Бортникова и др., 2009; Удачин, 2012; Филимоненко, 2015; Леженин и др., 2016; Sierra-Hernández et al., 2018; Vlasov et al., 2020; Артамонова, 2020; Московченко и др., 2021; 2023; Astray et al., 2024; Starodymova et al., 2024; Опекунов и др., 2024; Пожитков, 2024).

Объектом исследований является нерастворимая фракция снежного покрова (нерастворимый осадок), сформированная аэрозольными частицами, осевшими в снежном покрове. **Предмет исследований** – уровень пылевой нагрузки, химический и минерально-вещественный состав нерастворимой фракции снежного покрова.

Цель работы – оценка эколого-геохимической обстановки на территории г. Кемерово на основе изучения химического и минерально-вещественного состава нерастворимой фракции снежного покрова.

Задачи исследований:

1. Установить пространственную изменчивость уровня пылевой нагрузки на территории города.

2. Выполнить эколого-геохимическое районирование территории города по уровню накопления и ассоциациям химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова.

3. Изучить многолетнюю динамику (2016-2023 гг.) и факторы формирования пылевой нагрузки и химического состава нерастворимой фракции снежного покрова в районах города, подвергаемых воздействию предприятий теплоэнергетики и коксохимии.

4. Провести количественный анализ содержания техногенных образований, характеризующих специфику состава нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния теплоэнергетических предприятий.

Фактический материал и методы исследования. В основу диссертационной работы положены материалы исследований, собранные при личном участии автора во время обучения с 2016 г. по 2024 г. в отделении геологии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета.

Научно-исследовательская работа выполнялась при финансовой поддержке стипендии компании British Petroleum (2018-2019 гг.) и Неправительственного экологического фонда имени В.И. Вернадского (2020 г.).

В основу научной работы положены результаты исследований *68 проб* снежного покрова и трех проб золы уноса предприятия теплоэнергетики.

При личном участии автора выполнялся отбор и подготовка проб снежного покрова в соответствии с нормативно-методическими документами (РД 52.04.186-89; Методические рекомендации ИМГРЭ ..., 1982) и опубликованными работами (Саэт и др., 1990; Шатилов, 2001; Язиков, 2006; Таловская, 2008; 2022; Бортникова и др., 2009; Янченко и др., 2013; Касимов и др., 2012; 2016; Филимоненко, 2015; Рапута и др., 2017). Снеговая съемка проводилась на территории города в масштабе 1:50000 со сгущением и разряжением сети в некоторых районах. Векторная система наблюдений, на расстоянии от 0,5 до 4,5 км применялась в северо-восточном и юго-западном направлениях от предприятий теплоэнергетики и коксохимического производства.

Химический состав *68 проб* нерастворимой фракции снежного покрова и трех проб золы уноса исследован инструментальным нейтронно-активационным анализом (ИНАА) на содержание 28 химических элементов в лаборатории учебно-научного центра «Исследовательский ядерный реактор» центра коллективного пользования УНУ ИРТ-Т. В лабораториях МИНОЦ «Урановая геология» на базе отделения геологии ТПУ при личном участии автора осуществлялось измерение ртути в *55 пробах* нерастворимой фракции снежного покрова и золы уноса методом

атомно-абсорбционной спектрометрии (ААСМ, анализатор РА-915+ с приставкой ПИРО-915), изучение минерально-вещественного состава *54 проб* микроскопическим анализом (бинокулярный стереоскопический микроскоп LeicaZN 4D с видео-приставкой; патент № 2229737, 2004 г., авторы: Е.Г. Язиков, А.Ю. Шатилов, А.В. Таловская), *11 проб (147 частиц)* сканирующей электронной микроскопией (микроскоп Hitachi S-3400N с ЭДС Bruker XFlash 4010) и *7-ми проб* рентгенофазовым анализом (дифрактометр Bruker D2 Phaser). Пробы жидкой фазы снежного покрова (*11 проб*) исследованы на содержание 58 химических элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) в химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск). Отдельные пробы жидкой фазы снега (*5 проб*) проанализированы на содержание некоторых органических веществ в аккредитованной лаборатории г. Томска.

По полученным результатам производился расчет эколого-геохимических показателей: пылевая нагрузка (P_n), коэффициент концентрации (K_c), суммарный показатель загрязнения (Z_c), фактор обогащения (ФО) в соответствии с опубликованными работам (Методические рекомендации ИМГРЭ ..., 1982; Саэт и др., 1990; Касимов и др., 2012; 2016). Производилась статистическая обработка результатов исследования в ПО «Statistica». Построение карт-схем осуществлялось в ПО «Surfer» и ПО «Corel Draw». Уровни пылевой нагрузки оценивались по общепринятой градации (Методические рекомендации ИМГРЭ ..., 1982; Саэт и др., 1990; Касимов и др., 2012; 2016) и градации относительно фона для юга Сибири (Таловская, 2022). Фоновые уровни содержания химических элементов в пробах приняты по данным сотрудников отделения геологии ТПУ (Шатилов, 2001; Язиков, 2006; Филимоненко, 2015; Таловская, 2022).

Защищаемые положения.

1. На территории г. Кемерово уровень пылевой нагрузки изменяется от 15 до 610 мг/(м²·сут.) и формируются ореолы преимущественно со средним и высоким уровнем загрязнения. В городе выделены четыре геохимические зоны, характеризующиеся специфичными ассоциациями элементов в нерастворимой

фракции снежного покрова, сформированные в основном воздействием предприятий теплоэнергетики и химической промышленности.

2. В зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово в период проведения мониторинга (2016-2023 гг.) уровень пылевой нагрузки в среднем изменяется от 245 до 380 мг/(м²·сут.) и связан с влиянием метеопараметров. В нерастворимой фракции снежного покрова концентрации Са, Sc, Sr, Cs, Ba, Hf, Ta, Hg, Th, U и лантаноидов являются повышенными в 2-25 раз относительно фона, что обусловлено объемами потребления топлива на предприятии теплоэнергетики, составом угля и золы уноса.

3. По мере удаления от предприятий теплоэнергетики г. Кемерово в нерастворимой фракции снежного покрова увеличивается доля муллита (13-30 %), уровень отношения муллита к кварцу (0,4-1,8 ед.) и процент встречаемости алюмосиликатных микросферул, уменьшается доля шлака и угольных частиц, неоднородно распределяется частота встречаемости специфичных техногенных металлосодержащих микрочастиц – ферросферул и микрофаз, содержащих барий и редкоземельные элементы.

Научная новизна работы.

1. Выделены зоны атмотехногенного воздействия промышленных производств и объектов теплоэнергетики на окружающую среду на основе пространственного распределения уровней пылевой нагрузки и геохимических ассоциаций в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово.

2. Выявлено формирование уровней пылевой нагрузки и геохимической специфики состава нерастворимой фракции снежного покрова в зависимости от метеорологических и технологических параметров на теплоэлектростанции (потребление топлива, состав углей Кузнецкого бассейна и золы уноса) на основе данных многолетнего эколого-геохимического мониторинга (2016-2023 гг.) в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово.

3. Даны количественные оценки и определены особенности распределения уровней содержания индикаторных техногенных минеральных

образований (муллит) и микрочастиц (микросферулы; микрофазы, содержащие барий и редкоземельные элементы; шлак и угольные), отношения муллит/кварц в нерастворимой фракции снежного покрова по направлению основного переноса вещества от предприятий теплоэнергетики.

Практическая значимость работы заключается в качественной и количественной оценке эколого-геохимического состояния атмосферного воздуха на территории г. Кемерово в зимний период, а также в определении геохимической специфики воздействия объектов угольной теплоэнергетики и коксохимического производства на окружающую среду.

Созданы карты-схемы эколого-геохимической оценки территории города на основе изучения состава атмосферных поллютантов, осевших в снежном покрове, обеспечивающие информационную поддержку принятия экологически значимых решений на уровнях территориального управления. Выделены зоны воздействия техногенных объектов на городскую среду, которые можно учитывать при планировании землепользования.

Результаты работы могут быть использованы природоохранными органами Кемеровской области, отделами охраны окружающей среды предприятий для совершенствования природоохранных мероприятий и методов экологического мониторинга, проведения зонирования территории города по уровню экологического риска для здоровья населения.

Материалы диссертационной работы использованы при проведении лекционных занятий по курсу «Экологический мониторинг» для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Экология и природопользование» в отделении геологии Инженерной школы природных ресурсов ТПУ.

Достоверность защищаемых положений определяется статистически значимым количеством проб, отобранных и подготовленных по единой апробированной методике, и проанализированных различными современными высокочувствительными аналитическими методами в аккредитованных лабораториях с использованием стандартных образцов сравнения; обработкой полученных данных с использованием статистическо-математических и

картографических методов; тщательной проработкой литературы по теме научного исследования.

Апробация работы. Результаты работы автором представлены на 26 Международных и Всероссийских научных конференциях, симпозиумах, форумах, конгрессах, в т.ч. на Всероссийской научной конференции имени профессора М.К. Коровина (г. Томск, 2015 г.), Международном научном симпозиуме студентов, аспирантов и молодых ученых «Проблемы геологии и освоения недр» имени академика М.А. Усова (г. Томск, 2016-2024 гг.), Международной экологической студенческой конференции «Экология России и сопредельных территорий» (г. Новосибирск, 2017 г., 2018 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Природопользование и охрана природы» (г. Томск, 2018 г.), Международном Российско-Казахстанском Симпозиуме «Углекислотная химия и экология Кузбасса» (г. Кемерово, 2018 г.), конференции «Аэрозоли Сибири» (рабочая группа) (г. Томск, 2018 г., 2022 г.), Всероссийской конференции-конкурсе студентов и аспирантов (г. Санкт-Петербург, 2019 г., 2021 г.), Международном форуме-конкурсе студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2019 г., 2021 г.), Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы Свободный – 2020» (г. Красноярск, 2020 г.), Международном молодежном научно-практическом конгрессе «Нефтегазовые горизонты» (г. Москва, 2020 г.), Байкальской международной научной конференции «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли: химия и климат» (г. Иркутск, 2021 г.), VI Международном молодежном экологическом форуме (г. Кемерово, 2022 г.), Международном Симпозиуме «Инженерная экология-2023» (г. Москва, 2023 г.), XIV Международной Биогеохимической школе-конференции «Проблемы геохимической экологии в условиях техногенеза биосферы» (г. Томск, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 23 работы, из них 3 статьи в изданиях, индексируемых международными базами данных Web of Science и Scopus, и в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Рукопись изложена на 146

страницах машинописного текста, включающего 37 рисунков и 37 таблиц. Список литературы включает 202 источника, из которых 54 на иностранном языке.

Глава 1 посвящена научным исследованиям влияния объектов теплоэнергетики и коксохимии на компоненты природной среды и здоровье населения.

В главе 2 описаны природно-климатические и геоэкологические условия г. Кемерово.

Глава 3 отражает методическую часть исследований, в которой описаны полевые и камеральные этапы работы по отбору, подготовке и анализу проб снежного покрова, включая характеристику лабораторно-аналитических методов и методику обработки полученных данных.

В главе 4 изложены результаты распределения уровня пылевой нагрузки на территории города и многолетней динамики (2016-2023 гг.) формирования пылевой нагрузки в зонах влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии с учетом метеопараметров.

Глава 5 содержит геохимическую характеристику состава нерастворимой фракции снежного покрова на территории города, результаты эколого-геохимического районирования города по концентрациям и ассоциациям химических элементов в пробах, данные многолетнего мониторинга формирования химического состава проб в зонах влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимического производства в зависимости от природно-техногенных факторов (метеопараметры, топливно-энергетический баланс, состав угля и золы уноса).

В главе 6 приводятся результаты изучения минерально-вещественных характеристик состава нерастворимой фракции снежного покрова в зоне распространения выбросов предприятий теплоэнергетики.

В заключении представлены основные выводы и рекомендации.

Личный вклад автора заключается в планировании полевых работ; непосредственном отборе и подготовке проб снежного покрова (общей массой снега около 700 кг); в совместном проведении с сотрудниками отделения геологии

ТПУ исследований проб нерастворимой фракции снежного покрова в лабораториях МИНОЦ «Урановая геология»; эколого-геохимической, статистической обработке и интерпретации полученного массива данных, построении графического материала.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю, профессору отделения геологии ИШПР ТПУ, д.г.-м.н. Таловской А.В. за тесное сотрудничество, терпение, понимание, ценные советы и помощь при проведении научных исследований и подготовки диссертации.

Благодарность автор выражает профессору отделения геологии, д.г.-м.н. Языкову Е.Г., профессору, д.г.-м.н. Рихванову Л.П., сотрудникам отделения геологии за внимание и советы во время выполнения работы. Автор проявляет признательность профессору отделения геологии, д.г.-м.н. Арбузову С.И. за предоставление материалов о составе углей для выполнения сравнительного анализа данных. Автор выражает благодарность исполнителям аналитических исследований проб: инженерам ТПУ Судыко А.Ф. и Богутской Л.В., директору ХАЦ «Плазма» Федюниной Н.В. Автор благодарен за помощь в проведении лабораторно-аналитических исследований проб в МИНОЦ «Урановая геология» сотрудникам отделения геологии: к.х.н., доценту Осиповой Н.А., к.г.-м.н., старшему преподавателю Ильенку С.С., к.г.-м.н., доценту Соктоеву Б.Р., аспирантам Зайченко А.П. и Усольцеву Д.Г. Автор благодарит к.г.-м.н. Першину (Володина) Д.А. и Филимоненко Е.А. за предоставленные пробы нерастворимой фракции снежного покрова за 2016 г. для изучения. Отдельную благодарность автор выражает своей семье за моральную поддержку и помощь при отборе проб снежного покрова.

Глава 1. Обзор исследований влияния объектов теплоэнергетики и коксохимии на окружающую среду

1.1 Характеристика производственной деятельности угольной теплоэнергетики и виды загрязняющих веществ

Уголь является одним из главных полезных ископаемых и видом топлива, который используется и добывается с давних времен. Потребление угля идет в первую очередь на угольные электростанции, которые занимаются выработкой и подачей электроэнергии жителям города и всем потребителям. Угольная теплоэнергетика представляет собой традиционный сектор энергогенерации, основанный на преобразовании химической энергии, аккумулированной в ископаемом угле, в электрическую и тепловую энергию (Основы ..., 2010). Ключевым технологическим звеном данного процесса являются тепловые электростанции (ТЭС), работающие на твердом топливе. Технологический цикл можно детализировать в виде последовательности основных этапов.

Первоначальным этапом является подготовка топлива. Добытый уголь проходит стадии дробления и тонкого измельчения до состояния пыли в специальных мельницах. Данная операция критически важна для увеличения площади поверхности контакта топлива с окислителем (воздухом), что обеспечивает последующее более полное и эффективное сгорание.

Основной процесс преобразования энергии происходит на втором этапе – сжигание топлива. Угольная пыль вдувается в топку парового котла, где осуществляется её воспламенение и горение при высоких температурах (1200-1500 °С). Выделяющееся при этом тепло передается воде, циркулирующей по системе трубных поверхностей нагрева, расположенных внутри котла.

Третий этап – генерация пара. Получаемый в котле насыщенный пар дополнительно нагревается до состояния перегрева, что значительно повышает его термический КПД. Перегретый пар высокого давления (до 24 МПа) и температуры (до 565 °С) является основным рабочим телом для следующего узла.

На этапе преобразования тепловой энергии в механическую пар направляется на лопатки паровой турбины, приводя её в быстрое вращение. Турбина кинематически соединена с ротором электрогенератора, где механическая энергия вращения преобразуется в электрическую энергию (пятый этап) за счет явления электромагнитной индукции.

Завершающей стадией цикла является конденсация и рециркуляция (Рыжкин, 1987). Отработанный пар, покинувший турбину, поступает в конденсатор, где охлаждается, как правило, водой из внешних источников (реки, водохранилища) или в градирнях, и конденсируется обратно в воду. Конденсат после подогрева и деаэрации возвращается в котел питательными насосами, замыкая технологическую цепь.

Угольная теплоэнергетика признается одним из наиболее значимых антропогенных источников поступления загрязняющих веществ в окружающую среду (Хаустов и др., 2005). Воздействие носит комплексный характер и проявляется на всех стадиях технологического цикла – от дождевания угля до складирования твердых отходов. Состав и объем выбросов определяются качеством сжигаемого угля (зольность, содержание серы, летучих компонентов) и уровнем оснащённости станции системами газоочистки.

Ключевым продуктом сгорания углеродного топлива является диоксид углерода (CO_2). Уголь характеризуется наибольшими удельными выбросами CO_2 на единицу выработанной электроэнергии среди всех видов ископаемого топлива. Для сравнения, эмиссия CO_2 от современной угольной электростанции примерно в 1,8-2,2 раза превышает выбросы парогазовой установки аналогичной мощности (IEA ..., 2023). Помимо CO_2 , значительный вклад в парниковый эффект вносит метан (CH_4), высвобождаемый в процессе добычи угля в шахтах и при его транспортировке. Диоксид серы (SO_2) образуется при окислении серы, содержащейся в угле (Шакирова, 2007), и является основной причиной выпадения кислотных осадков, приводящих к деградации лесов и закислению водоемов.

Образование оксидов азота (NO_x) обусловлено высокотемпературным окислением азота воздуха и азотсодержащих соединений топлива (Шакиров, 2007), которые участвуют в формировании фотохимического смога и кислотных дождей.

Твердые частицы (взвешенные вещества, $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10}) представляют собой несгоревшие частицы угля, золы и сажи. Мелкодисперсные фракции ($\text{PM}_{2.5}$) обладают высокой проникающей способностью в дыхательную систему человека. Твердые частицы могут вызывать астму и хронический бронхит (Newman, 2001; Csavina et al., 2012; Касимов и др., 2012; Veremchuk et al., 2018; Lee et al., 2020; Информационно-технический ..., 2022). Влияние $\text{PM}_{2.5}$ увеличивает также риск смерти от болезней сердца, респираторных заболеваний и рака легких (Eia ..., 2016; WHO ..., 2013).

На угольных электростанциях угольная летучая зола является источником твердых частиц, сульфатов и нитратов (MacEwen et al., 1976). Угольная летучая зола – это негорючие материалы, которые составляют 20 % от собранной угольной золы (Grahame et al., 2007). На каждые 4 тонны сгоревшего угля производится 1 тонна золы (Zierold et al., 2022).

Тяжелые металлы и металлоиды, редкоземельные и радиоактивные элементы являются элементами-примесями в углях и в процессе горения угля поступают в атмосферу как в виде парогазовых смесей, так и в составе тонкодисперсных частиц золы уноса, создавая риск загрязнения различных компонентов окружающей среды (Юдович и Кетрис, 2005; Арбузов, 2007).

Радиоактивные выбросы, образующиеся из летучей золы на угольных электростанциях, в 100 раз превышают выработку ядерной энергии с той же производительностью по энергии (Isajenko et al., 2025). Например, на угольной электростанции мощностью 1000 МВт может выделяться 5,2 тонны в год урана U^{235} и 12,8 тонны тория (The economics ..., 2013). Атомная электростанция мощностью 1000 МВт могла бы производить около 750 кг радиоактивных отходов с высоким уровнем активности и 225 кг плутония в год.

К твердым отходам производства относятся зола уноса и шлак, образующиеся в больших объемах. Их складирование в золоотвалах приводит к

изъятию земель и создает риски загрязнения почв и грунтовых вод фильтратами (Информационно-технический ..., 2022).

Согласно данным глобальной системы мониторинга энергетики (Global Energy Monitor), по состоянию на 2023 год в мире насчитывалось более 2300 электростанций, на которых эксплуатировалось около 8500 энергоблоков, работающих на угле (Global ..., 2023). Географическое распределение крайне неравномерно. Абсолютным лидером является Китай, на долю которого приходится около половины мировых установленных мощностей. Значительное количество станций сосредоточено также в Индии, США и странах Юго-Восточной Азии. В последнее десятилетие наблюдается разнонаправленная динамика: в странах организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) происходит постепенное выведение из эксплуатации старых угольных мощностей на фоне ужесточения климатической политики и роста конкурентоспособности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и газа, в то время как в развивающихся странах Азии продолжается ввод новых объектов (Global ..., 2023; ВР ..., 2023). Схема расположения угольных теплоэлектростанций в мире представлена на рисунке 1.1.1.

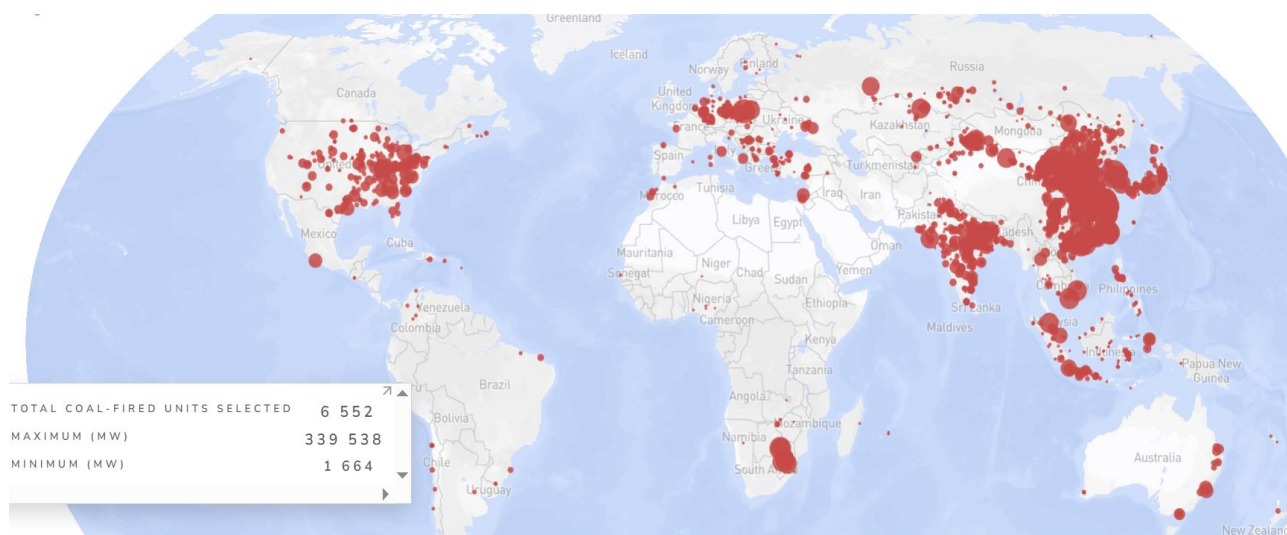


Рисунок 1.1.1 – Схема расположения угольных теплоэлектростанций в мире (Global ..., 2023)

Сегодня на территории России находится и функционирует 79 угольных электростанций и 7 коксохимических предприятий. По данным 2022 года добыча

угля составляет 385 млн. т, что занимает 6 место в мире после Китая, Индии, США, Австралии и Индонезии (Петренко, 2022).

Угольная генерация сохраняет важное значение в энергобалансе России, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока, расположенных вблизи угольных бассейнов. Согласно отчетам Системного оператора Единой энергосистемы (SO-UPS), в составе ЕЭС России по состоянию на 2023-2024 годы функционировало от 70 до 75 тепловых электростанций, для которых уголь является основным или резервным топливом (Отчет ..., 2024). С учетом изолированных энергорайонов (например, на Дальнем Востоке) общее количество таких объектов может быть несколько выше. Общее число энергоблоков, использующих уголь, превышает 200. Основным типом топлива на предприятиях теплоэнергетики в Сибири является уголь в связи с его доступностью и большим объемом добычи. Кузнецкий бассейн занимает первое место в российской сырьевой базе по запасам каменного угля, которые составляют почти 70 млрд. т; около половины их относится к коксующимся, в том числе 15,3 млрд. т – к особо ценным маркам (Государственный доклад..., 2023) (рисунок 1.1.2).



Рисунок 1.1.2 – Распределение запасов угля между субъектами Российской Федерации, млрд. т (О состоянии ..., 2023.)

В отличие от общемировой тенденции, в России не наблюдается стратегии на полный отказ от угля. Энергетическая стратегия предполагает модернизацию

существующего парка и, в отдельных случаях, строительство новых мощностей в угледобывающих регионах (Кузбасс, Хакасия) с внедрением более эффективных и менее вредных технологий сжигания (Энергетическая ..., 2020). При высоком уровне добычи угля степень освоения разведанных запасов России остается низкой и составляет всего 17 %. Основной объем ресурсов (83 %) находится в государственном резерве – нераспределенном фонде недр.

1.2 Характеристика производственного цикла коксохимического производства и виды загрязняющих веществ

Существуют углеперерабатывающий комплекс, включая коксохимическое производство, которое работает в отрасли черной металлургии для изготовления коксового газа, каменноугольного кокса и этилена, бензола, толуола и прочих химических материалов. Коксохимическое производство представляет собой сложный, многостадийный технологический процесс, целью которого является получение металлургического кокса – высокоуглеродистого продукта, незаменимого для доменной плавки черных металлов (Харлампович и др., 1995). Важнейшей отличительной чертой данного производства от многих других является его химико-технологическая направленность, поскольку параллельно с коксом осуществляется получение ценных химических продуктов (ПХХ) из летучих веществ, выделяющихся при коксовании угольной шихты.

Основные стадии классического коксохимического цикла включают:

1. Подготовка угольной шихты. Угли различных марок (преимущественно газовые, коксовые, отощенные) дробятся и смешиваются в определенных пропорциях для достижения оптимальных свойств будущего кокса. Шихта высушивается и измельчается до заданной фракции.

2. Коксование. Подготовленная шихта загружается в герметизированные коксовые печи, которые обогреваются с внешней стороны до температуры 1000-1100 °С. В бескислородной среде (пиролиз) происходит спекание угля с образованием коксового пирога. Процесс длится 14-18 часов. Ключевым

экологическим аспектом является герметичность печей, так как именно на этой стадии образуется основная масса летучих веществ.

3. Выдача кокса. Раскаленный коксовый пирог выталкивается из печи с помощью коксовыталкивателя в специальный вагон-тушитель. На этой стадии возникают значительные неорганизованные выбросы пыли и газов.

4. Тушение кокса. Раскаленный кокс охлаждается, как правило, путем мокрого тушения (водой) или, на более современных предприятиях, сухого тушения (инертным газом). Мокрое тушение сопровождается образованием больших объемов парогазовой смеси, содержащей токсичные вещества.

5. Улавливание и переработка химических продуктов. Летучие вещества (коксовый газ), выделившиеся в процессе коксования, по стоякам направляются в систему химических цехов. Здесь они последовательно проходят через аппараты, где из них извлекаются:

- Каменноугольная смола (в смолоотстойниках и скрубберах).
- Аммиачная вода и сульфат аммония (в сатураторах или установках бессатураторной переработки).
- Бензольные углеводороды (в скрубберах с поглотительным маслом).
- Очищенный коксовый газ используется как технологическое топливо на самом предприятии или отводится потребителю.

Каждая из этих стадий является потенциальным источником образования загрязняющих веществ, поступающих в атмосферный воздух, водные объекты и образующих твердые отходы (European ..., 2013).

Источники выбросов делятся на организованные (через трубы газоочистных установок) и неорганизованные (при загрузке шихты, выдаче кокса и т.д.). Последние представляют наибольшую экологическую проблему.

Коксохимическое производство загрязняет атмосферу такими веществами, как сажа, диоксид серы, оксиды азота, оксид углерода, аммиак, фенол, сероводород, гидроцианид, бензол, нафталин (Лейбович и др., 1982). Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), такие как бенз(а)пирен, являющийся наиболее опасным канцерогеном, а также другие представители этого класса

(пирен, фенантрен, антрацен) образуются при пиролизе угля. Источником оксидов серы (SO_x) преимущественно сернистого ангидрида (SO_2) является сжигание коксового газа. Оксиды азота (NO_x): продукты высокотемпературного горения в подогревательных каналах печей. Летучие органические соединения (ЛОС): бензол, толуол, ксилолы, фенол, нафталин и другие ароматические углеводороды, улетучиваются на стадиях коксования и переработки. Сероводород (H_2S) и цианистый водород (HCN) поступают в окружающую среду так как содержатся в коксовом газе (Хайрулин и др., 2014).

На 1 т перерабатываемого угля выделяется около 0,75 кг SO_2 и по 0,03 кг различных углеводородов и аммиака (Лейбович и др., 1982). Кроме газов, коксохимическое производство выделяет в атмосферу большое количество пыли. Твердые частицы содержатся в пыли угольной шихты и коксовой пыли в виде взвешенных частиц $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} . Имеются данные, что при производстве кокса на 1 т перерабатываемого угля выделяется около 3 кг угольной пыли. Также большое количество пыли выделяется при разгрузке и перегрузке угля, в среднем 0,005 % от массы угля.

В коксохимическом производстве источниками технологических выбросов являются аспирационные системы цеха углеподготовки, отопительная система коксовых печей, системы загрузки угля и выдачи кокса, системы тушения кокса, коксовые рампы, коксосортировка, а также химические цеха. При загрузке коксовых печей угольной шихтой выделяется из каждой камеры в окружающую атмосферу 1,5 - 2,4 кг пыли и 40 - 50 м^3 газов, в результате чего запыленность воздуха на рабочих местах коксового цеха и прилегающей территории во много раз превышает допустимую норму (10 $\text{мг}/\text{м}^3$) (Рудыка и др., 2003). Концентрация взвешенных частиц в промышленных газах, при обработке угля, довольно высокие: от мельниц средняя концентрация взвешенных частиц достигает 20 - 50 $\text{г}/\text{м}^3$, от сушильных установок, для бурого угля 12 - 25 $\text{г}/\text{м}^3$, для каменного угля 10 - 20 $\text{г}/\text{м}^3$.

Основными загрязнителями сточных вод коксохимического производства являются соли аммония, роданиды, цианиды, нитриты, нитраты, фенолы,

пиридиновые основания, смолы и масла и прочие загрязнители (Ахметов и др., 2009).

К основным видам отходов относятся отходы очистки сточных вод (осадки, шламы), дефебризованная смола и другие продукты переработки, пыль от улавливания газоочистных установок.

Мировое производство кокса практически полностью ориентировано на нужды черной металлургии. Географически оно сосредоточено в странах с развитой сталелитейной промышленностью. По данным международных отраслевых ассоциаций (например, World Steel Association) и аналитических обзоров, по состоянию на 2022-2023 годы в мире действовало около 350-400 коксовых батарей (установок, объединяющих несколько десятков печей) (World ..., 2023). Крупнейшим производителем является Китай, на долю которого приходится более 70 % мирового выпуска кокса. Значительные мощности расположены также в Индии, Японии, Южной Корее, странах Европейского союза (особенно в Германии и Польше) и США. Общемировая тенденция характеризуется сокращением числа предприятий в развитых странах из-за ужесточения экологических норм и переносом мощностей в Азию (World ..., 2023; Global..., 2024).

Коксохимическое производство России является неотъемлемой частью металлургического комплекса и стратегически важной отраслью. По состоянию на 2024 год функционирует 12 крупных коксохимических производств (цехов, заводов), входящих в состав металлургических компаний (Энциклопедия ..., 2024). Они расположены преимущественно в основных металлургических центрах:

- Кемеровская область (Кузбасс): ПАО «Кокс» (г. Кемерово), Коксохимическое производство на ОАО «НКМК» (г. Новокузнецк) и др.
- Уральский регион: Коксохимическое производство ПАО «ММК» (г. Магнитогорск), АО «ЕВРАЗ НТМК» (г. Нижний Тагил).
- Другие регионы: КХП ОАО «Северсталь» (г. Череповец), ООО «ЗСМК» (г. Новосибирск).

Общее количество действующих коксовых батарей в России оценивается примерно в 40-45 единиц. Характерной тенденцией для российской отрасли является не строительство новых заводов, а модернизация существующих мощностей с внедрением ресурсосберегающих и экологически более чистых технологий (например, систем сухого тушения кокса, замкнутых циклов водопользования, эффективных систем аспирации и газоочистки) (Распоряжение ..., 2022).

1.3 Оценка загрязнения компонентов природной среды

Разным аспектам воздействия на компоненты природной среды топливно-энергетического и углеперерабатывающего комплекса в различных районах России и мира посвящены исследования.

Определено, что летучая зола может перемещаться на расстояние до 40-50 км по направлению ветра от теплоэлектростанций (Pandey, 2014). Впоследствии, вызывая деградацию земель, серьезное загрязнение воздуха и воды и болезни у растений, животных, в том числе у человека. В этой зоне воздействия вредные вещества были обнаружены даже в молоке коров. Причем именно в зимний период масса сжигаемого топлива достигает максимума, и твердые вещества в результате гравитационного осаждения загрязняют снежный покров (Роговенко и др., 2010).

Максимальное техногенное воздействие выбросов теплоэлектростанций сосредоточено в локальной зоне воздействия (Гришанцева, 2012). В работах, посвящённых изучению компонентов природной среды в зонах подверженных выбросам объектов теплоэнергетики, выделяют элементы, являющиеся индикаторами воздействия данных объектов на окружающую среду.

Согласно исследованию в г. Томск, наличие таких элементов, как As, Zn, Be и P в почвах связано с влиянием теплоэнергетики (Язиков, 2006). Результаты геохимического анализа указывают также на загрязнение почвогрунтов группой редкоземельных и радиоактивных элементов в окрестностях Томской ГРЭС-2 (Жорняк, 2009). В данной работе определено, что превышение регионального фона в почвогрунтах для таких элементов, как Tb, Br, Sb, U, Ta, достигает 5-7 раз. Для

другой группы элементов (Ca, Rb, Ba, Cs, Yb, Cr, Fe, Lu, Na) характерно превышение фона в 2-5 раз. Также отмечается повышенное содержание ртути в почвогрунтах города в районе расположения ГРЭС-2 (Рихванов и др., 2010; Ляпина, 2012).

Подсчитано, что концентрация Th^{238} и Rd^{226} , K^{40} в верхнем 30-сантиметровом слое почвы в пределах 20 км от угольных электростанций увеличивается ежегодно в пределах от 0,03 до 0,12 % от соответствующей типичной естественной концентрации в почве (Baig et al., 2017).

Исследование о влиянии теплоэнергетики на селитебные зоны, проведенное в 2007-2011 гг. в г. Минусинске, показало устойчивую негативную динамику (Григоренко, 2013). Анализ комплексного индекса загрязнения атмосферы, учитывающего концентрации бенз(а)пирена, диоксида азота, оксида углерода, взвешенных веществ и формальдегида, выявил ежегодный рост содержания этих компонентов. Так, среднегодовая концентрация взвешенных веществ увеличилась с 0,76 до 1,62 ПДК. Уровень загрязнения атмосферы города стабильно характеризуется как «очень высокий», чему способствует неблагоприятное физико-географическое положение Минусинска: частые приземные инверсии и низкая скорость ветра препятствуют рассеиванию вредных примесей и приводят к их накоплению.

Снежный покров используется в исследованиях аэрозольных частиц многими учеными, позволяя определять их количество, особенности химического состава и пространственного распределения. Так же по данным изучения снежного покрова возможно выявлять пространственные ореолы загрязнения и определять загрязнение территории в конкретный зимний период с устойчивым снежным покровом (Саэт, 1990; Касимов, 1995; Сергеева и др., 2011; Касимов и др., 2012).

С разной степенью детальности проводятся работы по изучению химического состава снежного покрова в городах России, например, в Москве (Геохимия..., 1990; Маркова, 2003; Еремина и др., 2010; Касимов и др., 2012; Еремина, 2013), в Санкт-Петербурге и Ленинградской области (Зарина, 2009; Воронцова и др., 2013), в Благовещенске (Куимова и др., 2012; Юсупов и др., 2014),

Хабаровске (Новороцкая, 2002), Иркутской области (Оболкин и др., 2004; Скворцов и др., 2011; Янченко и др., 2013), Омске (Скрипко и др., 2013).

Поскольку атмосферный путь является одним из основных каналов поступления загрязняющих веществ от предприятий теплоэнергетики, важным объектом для оценки такого воздействия становится снежный покров. Анализ его химического состава широко применяется в экологических исследованиях различных городов России.

Например, в г. Новосибирске, где исследования нерастворимой фракции снежного покрова в зонах влияния теплоэнергетики выявили характерные техногенные геохимические аномалии Br, Ge, а также ряда тяжелых металлов (Sb, Sn, Cd, Se, Mo, Sr), превышающие фоновые значения в 10-40 раз (Девятова, 2006; Бортникова и др., 2009). Данные снеговой съемки также позволяли выявить в этих районах геохимические ореолы загрязнения ураном и торием (Попов, 2009; Артамонова, 2020). Аналогично, в районе воздействия Ново-Иркутской ТЭЦ в г. Иркутске, использующей местные бурые угли, к ключевым загрязнителям снежного покрова отнесены макроэлементы (Si, Fe, Mg, Mn) и некоторые редкоземельные элементы (Dy, Gd, Eu, Yb) (Филимонова, 2017). Сравнительный анализ загрязнения атмосферного воздуха в Улан-Удэ (Чудинова и др., 2024) выявил, что котельные на угле формируют значительно более высокие приземные концентрации загрязняющих веществ по сравнению с мазутными. Так, уровень диоксида серы от угольных котельных превышал аналогичный показатель для мазута в 2,5 раза, а по взвешенным веществам (золе) это превышение достигало 141 раза.

В зоне влияния ТЭЦ г. Омска зафиксированы максимальные коэффициенты концентрации для La, Sm, Tb, Yb, U в нерастворимом осадке снега (Литау и др., 2015). Нерастворимый осадок снега в зоне влияния ГРЭС г. Мыски демонстрируют значительное превышение фоновых уровней по ряду элементов (U, Tb, Yb, La, Hg, Ba, Sr, Ce, Ta, Sm, Th) (Таловская, 2022).

Сотрудниками отделения геологии ИШПР с 1990-х годов осуществляется мониторинг снежного покрова в окрестностях промышленных предприятий г.

Томска, в том числе в зоне воздействия ГРЭС-2. По результатам многолетних исследований авторы отмечают, что в окрестностях ГРЭС-2 в составе нерастворимой фракции снежного покрова специфичными элементами являются Na, Ba, Sb, La, Sm, Yb, Lu, U, Ta, Bi, W, As, Fe, Sr, вещественный состав представлен алюмосиликатными микросферами ассоциированными с кварцем и муллитом, металлическими микросферами с ферритами Mg, Ca и Mn, сажей, углем и шлаком, металлосодержащими микрочастицами установлено, что тяжелые металлы, редкоземельные, редкие и радиоактивные элементы концентрируются преимущественно на твердых частицах и только небольшая часть переходит в раствор (Таловская и др., 2014; Филимоненко, 2015; Таловская, 2022). Так же авторами (Таловская и др., 2014). В г. Томск также изучали минерально-вещественный состав проб нерастворимого осадка снежного покрова и почвогрунтов вблизи предприятия теплоэнергетики и были обнаружены алюмосиликатные и железосодержащие микросферулы, металлосодержащие микрочастицы различного состава (Таловская, 2008; 2022; Жорняк, 2009; Филимоненко, 2015).

Многочисленные исследования подтверждают широкое распространение алюмосиликатных и железосодержащих микросферул, образующихся при сгорании угля, в компонентах природной среды, в т.ч. и снежном покрове. Микросферулы обнаружены в снежном покрове районов расположения ТЭЦ, например, г. Новосибирска (Девятова, 2005) и г. Иркутска (Филимонова, 2017), а также на фоновых территориях, удаленных от урбанизации, – в Арктике (Шевченко, 2006) и на профиле от Томска до эстуария Оби (Шевченко и др., 2015). Эти находки служат доказательством способности микросферул переноситься на значительные расстояния от их источников.

Ключевым источником поступления токсичных элементов в окружающую среду является коксохимическое производство, в технологических цепочках которого происходит их концентрирование. Как показывают исследования, технологическая пыль коксохимических предприятий характеризуется экстремально высоким содержанием ртути. Так, кларки концентрации могут

превышать 1000 единиц, а на коксохимическом заводе в г. Видное содержание ртути в пыли до её очистки достигало 50 мг/кг (Саэт и др., 1990). Учитывая, что для данного производства характерны интенсивные пылевывбросы, складывается устойчивый риск загрязнения ртутью среды обитания в районах размещения коксовых заводов.

Среднее содержание ртути в пылевых выбросах коксохимического производства (г. Днепропетровск), поступающих в атмосферу, составляло 0,07 мг/кг, что находится на уровне ее фона в почвах (Какарека и др., 1998).

Выбросы пыли, оксидов серы, азота, углерода от коксохимического производства приводят к техногенной трансформации химического состава снеговых вод. При поступлении больших количеств пыли в окружающую среду наблюдается подщелачивание снеговых вод до 8,5-9,5 рН и увеличение содержания кальция, магния, гидрокарбонат ионов за счет растворения техногенных карбонатов, содержащихся в пыли. Поступление оксидов серы (тепловые станции на угле, цветная металлургия, коксо- и нефтехимия) ведет, наоборот, к подкислению снеговых вод. Иногда наблюдается зональность щелочнокислотных условий: во внутренней зоне загрязнения воды имеют щелочную реакцию, во внешней зоне - более кислую. При подщелачивании и подкислении происходит увеличение минерализации и техногенная трансформация состава вод (Яковлев и др., 1978).

Что касается изучения за рубежом, то в США учеными из Университета в Буффало и SUNY Fredonia, был выявлен повышенный уровень токсинов в почве, включая свинец, ртуть, мышьяк, цианид и полихлорированные бифенилы, в зоне воздействия коксохимического завода (Investigative ..., 2019). После предоставления результатов на городском уровне, завод закрыли.

Атмосферное загрязнение в Китае изучается более детально, ведь именно Китай является первым по производству кокса. Китайские ученые отдельно изучали влияние каждого процесса коксования (загрузка угля, транспортировка, гашение, горение в различных типах коксовых печей). Результаты оценки показали, что особое влияние на атмосферный воздух идет от коксовых печей,

полный перечень выбросов типичных первичных загрязнителей воздуха (TSP, PM_{2,5}, SO₂, NO_x, ЛОС, ПАУ, СО и CH₄) от коксохимической промышленности были установлены с использованием восходящих коэффициентов выбросов (методология на период 2011–2015 гг.). Долгосрочное воздействие выбросов из коксовой печи приводит к воспалению кожи и внутренних век, а также к поражению легких и желудка (Zhu et al., 2001; He et al., 2006; Liu et al., 2009; Му, 2013; Ge et al., 2016; Wu et al., 2017).

Группу из 40 самцов и группу из 40 самок крыс линии Sprague-Dawley подвергали воздействию аэрозоля, который поступал в атмосферу от коксохимического завода, в концентрации 10 мг/м³ в течение шести часов в день, пять дней в неделю, в течение 18 месяцев. Среди обработанных крыс у 38/38 мужчин и 31/38 женщин развился плоскоклеточный рак легкого. В контрольных группах такие опухоли не наблюдались у 36/40 самцов и 37/40 самок (MacEwen et al., 1976).

Для оценки опасности загрязнения тяжелыми металлами (As, Cd, Cr, Co, Cu, Pb, Ni, Zn) коксохимического завода для граждан, проживающих поблизости, было проведено обследование почвы и растений в районе коксохимического завода в городе Цзюань (Китай) (Leung, 2010). Результаты показали, что концентрация этих 8 типов тяжелых металлов на объекте превышает предельно допустимые значения, причем свинец является тяжелым металлом, который в наибольшей степени превышает нормы биологического воздействия.

Проведенный анализ научной литературы позволил оценить характер воздействия объектов угольной теплоэнергетики и коксохимического производства на окружающую среду:

1. Технологические процессы угольной теплоэнергетики и коксохимии являются источниками комплексного поступления в окружающую среду широкого спектра загрязняющих веществ. Ключевыми приоритетными загрязнителями атмосферного воздуха выступают твердые частицы, диоксиды серы и азота, тяжелые металлы, а для коксохимических производств – высокотоксичные специфические соединения, такие как ПАУ, в частности бенз(а)пирен, летучие

органические соединения (бензол, фенолы) и цианистый водород. Объекты формируют устойчивые очаги комплексного химического и физического загрязнения всех компонентов окружающей среды.

2. Негативное воздействие данных отраслей на окружающую среду носит не только локальный, но и региональный характер. Пылевые выбросы и газообразные загрязнители способны мигрировать на значительные расстояния, формируя обширные геохимические аномалии в компонентах природной среды, что подтверждается результатами многочисленных эколого-геохимических исследований в промышленно-урбанизированных центрах.

3. Существует прямая корреляционная связь между объемами выбросов коксохимических производств и ростом заболеваемости населения злокачественными новообразованиями. Твердые частицы, поступающие от угольных ТЭС, увеличивают риски развития респираторных и сердечно-сосудистых заболеваний.

4. Снежный покров подтверждает свою эффективность как надежный инструмент для оценки атмосферных выпадений и картирования зон влияния предприятий теплоэнергетики. Однако, исследования снежного покрова в окрестностях коксохимических производств носят фрагментарный характер. Существующие работы часто ограничиваются анализом содержания преимущественно тяжелых металлов и металлоидов в снежном покрове, тогда как ключевой аспект – эколого-геохимический анализ атмотехногенного загрязнения территории на основе комплексного изучения химического и минерально-вещественного состава нерастворимой фракции снежного покрова на территориях под воздействием предприятий теплоэнергетики и химической промышленности – остается недостаточно изученным. Настоящее исследование направлено на восполнение этого пробела для получения новых данных о пространственно-временных особенностях формирования уровня пылевой нагрузки и минералого-геохимической специфики состава твердых частиц с использованием снежного покрова как депонирующей среды на урбанизированных территориях с развитым топливно-энергетическим и химическим производством.

Глава 2. Природно-климатическая и геоэкологическая характеристика г. Кемерово

2.1 Физико-географическая характеристика

Кемеровская область (Кузбасс) является одним из ключевых промышленных и экономических регионов Сибири. Город Кемерово, административный центр Кемеровской области, занимает центральное положение в Кузнецкой котловине на юго-востоке Западной Сибири, находясь на значительном удалении (более 3400 км) от Москвы. Его территория располагается в среднем течении реки Томь, в районе впадения притока Искитим, в зоне лесостепи. Особенностью планировки является расположение на двух берегах реки, которые соединены двумя автомобильными и одним железнодорожным мостом. Рельеф местности представляет собой увалисто-холмистую равнину, характерную для северной части Кузнецкого угольного бассейна (рисунок 2.1.1) (Доклад ..., 2017).

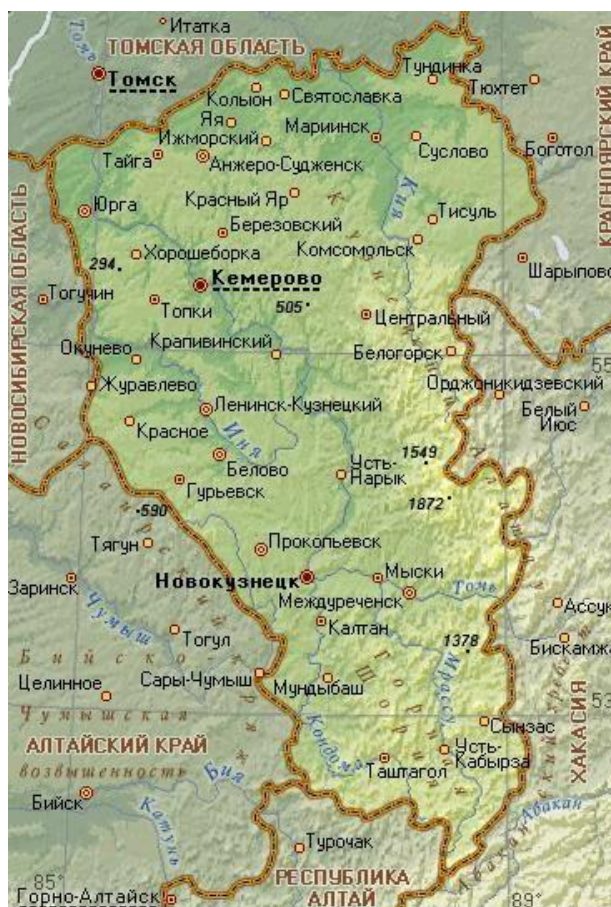


Рисунок 2.1.1 – Карта-схема расположения г. Кемерово на территории Кемеровской области (Кемеровская ..., 2020)

Город является не только управленческим ядром, но и фокусом, в котором наиболее ярко проявляются все типичные для Кузбасса процессы.

Территория Кемерово административно разделена на две основные зоны – правобережную и левобережную, границей между которыми служит река Томь. К левобережным округам относятся Заводский, Центральный и Ленинский, включая жилые районы Ягуновский и Пионер. Правый берег занимают Рудничный и Кировский районы, в состав которых входят Кедровка, Промышленновский и микрорайон Лесная Поляна.

Население составляет 557 тыс. человек. Общая площадь города по обоим берегам реки – 294,8 км².

2.2 Геолого-геоморфологическая характеристика

Геологическое строение района г. Кемерово определяется расположением его в северо- западной части Кузнецкого передового прогиба в зоне сочленения со структурами Томь-Колыванской складчатой области (Геологическое ..., 2019).

Геологическое строение исследуемого района обусловлено его расположением в поле развития пермских пород коренной основы, повсеместно перекрытых рыхлыми четвертичными образованиями различного генеза мощностью более 15 м. В геологическом отношении территория представлена следующими разновидностями грунтов: почва черная, высокопористая, сильносжимаемая, распространенная повсеместно; далее идет специфический грунт – суглинок легкий пылеватый, твердый, высокопористый, залегает в виде пласта мощностью 6,5-8,7 м; суглинок легкий и тяжелый пылеватый, тугомяглопластичный, низко и высокопористый (Геологическое..., 2019) (рисунок 2.2.1).

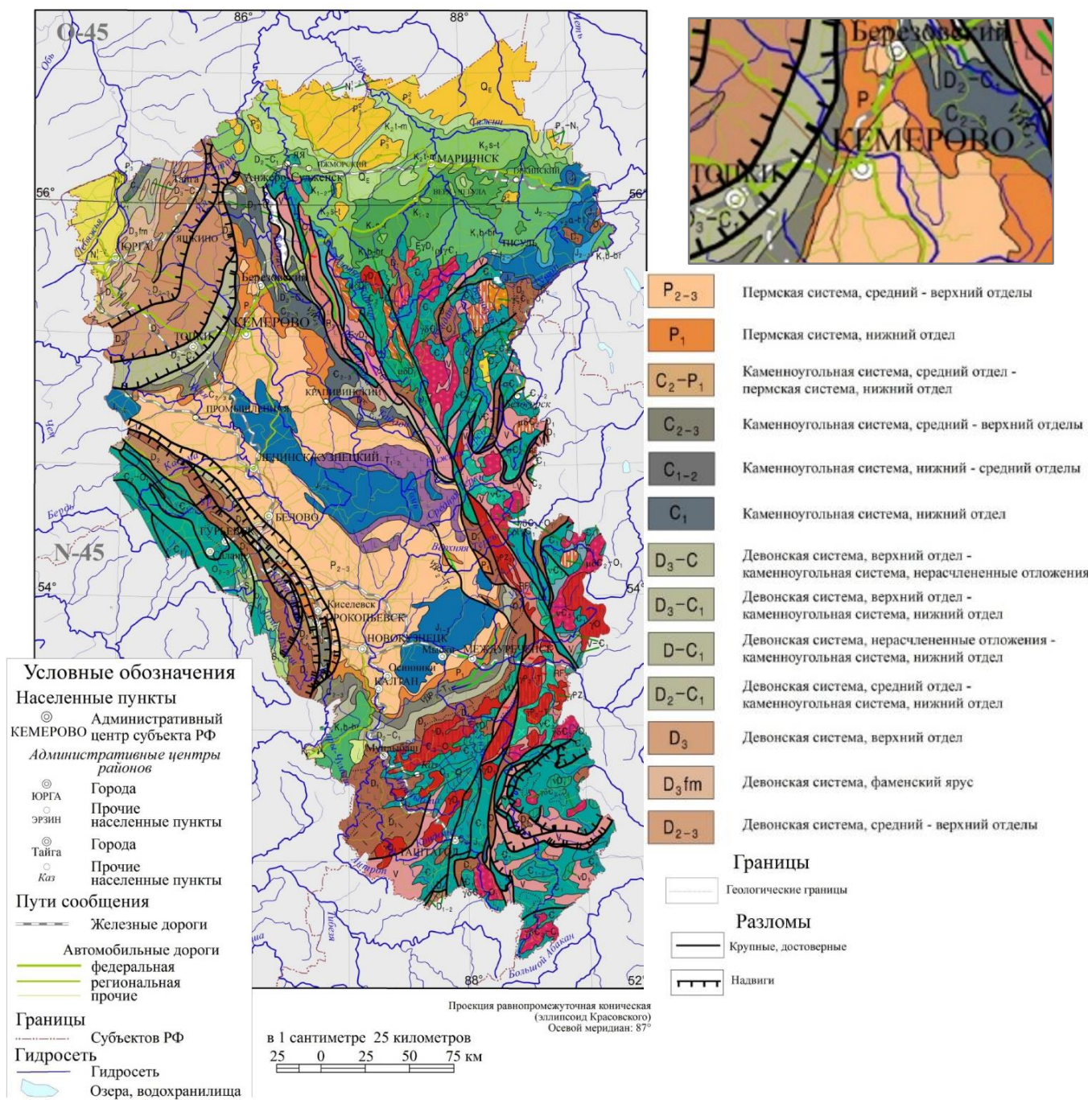


Рисунок 2.2.1 – Геологическое строение г. Кемерово (Государственная ..., 2001)

Основным полезным ископаемым считается уголь, а также имеется такое сырье, как глина, известняк, гравий, бутовой камень, лес. В совокупности с рекой, железнодорожными путями и удобной промышленной площадкой, сформирован мощный энергетический комплекс.

В геоморфологическом отношении район работ расположен в пределах увалисто-холмистой денудационно-эрозионной равнины севера Кузнецкой котловины (Акт ..., 2021). Характерными формами рельефа, которого является

вытянутые плосковершинные увалы, гривы с пологой иногда средней крутизны склонами, которые осложнены долинами мелких рек, логов и ложбин стока временных водотоков за счёт атмосферных вод. Участок трассы приурочен к водоразделу рек Томь и Осиновка. Водораздел осложнен современными молодыми эрозионными формами (ложбинами стока, балками), развитие которых продолжается в настоящее время. Водораздельные участки, в основном, покрыты травянистой растительностью. Водоразделы представляют реликты древней дочетвертичной равнины. Превышение над днищем долин составляет 90-110 м. Формы водоразделов сглаженные, вершинные поверхности плоские, склоны пологие, ровные, расчлененные долинами, логами, балками. Густота сети 0,64-1,81 км/км². На застроенной территории на отдельных участках естественный рельеф изменен: засыпаны лога, проведены планировочные работы (срезки, подсыпки), намыв грунта в поймах и т.д.

2.3 Климатическая характеристика

Климат района формируется резко континентальный. Для него характерна продолжительная холодная зима и короткое, но теплое лето. Зимний период в г. Кемерово холодный и на полтора месяца продолжительнее, чем календарная зима. Летний период умеренно влажный и тёплый, временами даже жаркий. Средний временной промежуток климатического лета в столице Кузбасса составляет 96 дней (Кемеровский ..., 2007).

Зима холодная и продолжительная, с большой повторяемостью серьезных морозов. Начинается зима во второй половине ноября и длится практически до конца марта. Среднемесячная температура самого холодного месяца колеблется от – 12.2 °С до – 21.5 °С. Абсолютный суточный минимум температуры – 48.4°С (декабрь 1966 г.). Средняя высота снежного покрова в г. Кемерово составляет 50-80 см (Доклад ..., 2017, 2021, 2023, 2024). Средняя продолжительность периода с отрицательными температурами составляет 172 дня. Весна растянутая, часты возвращения холодов. Лето непродолжительное, теплое и влажное. Максимальная среднемесячная температура воздуха составляет +19.0°С, а абсолютный максимум

+38.0°C отмечен в июле 1965 г. За год выпадает 505 мм осадков. Из них 40 % приходится на летние месяцы. Самый дождливый – июль, самый сухой – февраль и март. В течение всего года преобладают ветра южных, юго-западных и юго-восточных направлений, в зимний период преобладающее направление ветра остается прежним. В году менее часты ветра северных, северо-западных и северо-восточных направлений в теплый период (рисунок 2.3.1).

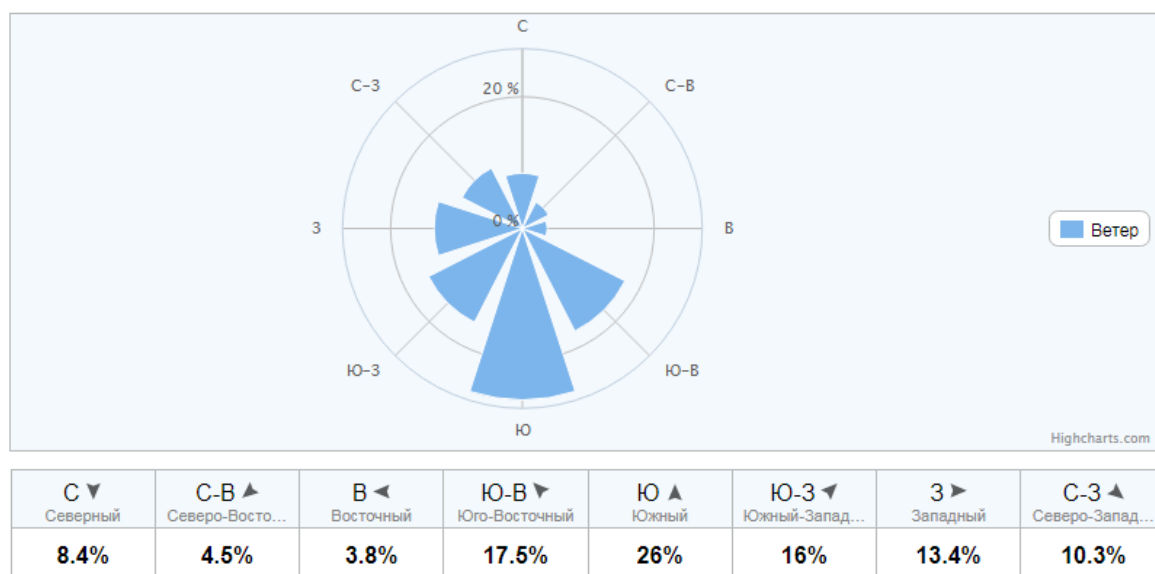


Рисунок 2.3.1 – Среднегодовая «роза» ветров г. Кемерово (Архив ..., 2024)

Метеорологические параметры в период эколого-геохимического мониторинга, выполняемого в рамках представленной работы, показаны в таблице 2.3.1 (Архив ..., 2024).

Таблица 2.3.1 – Метеорологические параметры в г. Кемерово с 2016 г. по 2023 г.

Год	2016	2022	2023
Температура воздуха, °С	-11,5	-11	-11,4
Скорость ветра, м/с	4	3,8	3,6
Относительная влажность воздуха, г/м ³	78,5	79,8	81,8
Сумма осадков, мм	130	155	140
Средняя высота снежного покрова, см	53	59	57

Примечание: данные метеостанций гидрометцентра на сайте world-weather.ru

2.4 Гидрология района

Гидрографическая сеть района принадлежит бассейну р. Томи, которая в свою очередь, является притоком реки Обь первого порядка (Доклад ..., 2017). По характеру водного режима р. Томь относится к алтайскому подтипу, для которого характерно весенне-летнее половодье и паводки в теплое время года. Главной фазой водного режима является весеннее половодье, которое проходит в несколько пиков, что обусловлено неравномерным снеготаянием на водосборе. Первый пик половодья формируется притоками, расположенными в Кузнецкой котловине, второй пик – притоками с залесенными водосборами, третья основная волна, которая накладывается на предыдущие пик, формируется правобережными притоками Кузнецкого Алатау и притоками с истоками, расположенными в Горной Шории. На половодье проходит 60-70% годового стока.

Среднегодовой расход р. Томи у Кемерово 1100 м³/сек. Средний многолетний годовой модуль стока колеблется от 30 до 50 л/сек км². Максимальные расходы воды наблюдаются во время весеннего половодья (с конца апреля до конца мая) и лишь в отдельные годы – во время летне-осенних дождевых паводков. Замерзают реки в середине ноября. Продолжительность ледостава 150-170 дней. Вскрытие рек происходит во второй половине апреля. Ледоход продолжается в среднем 3-10 дней и сопровождается образованием заторов.

2.5 Почвы района

Распространены аллювиально-луговые почвы по долинам рек, почвы хорошо обеспечивают ведение сельского хозяйства многоотраслевого направления – выращивание овощей и зерновых культур, развитие садоводства, животноводства и пчеловодства (Общая ..., 2024). Территория сельскохозяйственного назначения города составляет 5239 га.

В целом в Кемерово широкое распространение имеют черноземные почвы. По долинам рек широко распространены аллювиально-луговые почвы, располагающие обильным плодородием, так как достаточно обеспечены фосфором и калием. Данные почвы задействованы, как правило, под сенокосы и пастбища.

Достаточное увлажнение, значительный вегетационный период при продолжительном умеренном воздействии солнечной радиации, многообразие типов почв и хорошее их удобрение обеспечивают успешное ведением многоотраслевого сельского хозяйства. Территория сельскохозяйственного назначения города составляет порядка 5239 га.

Ведущими факторами формирования почвенного покрова являются рельеф, грунтовые воды и почвообразующие породы. На исследованной территории преобладают следующие виды почв – темно-серые лесные зональные и лугово-черноземные интразональные почвы. Мощность почвенно-растительного слоя в среднем 0,3 м.

2.6 Геоэкологическая характеристика г. Кемерово

В г. Кемерово функционируют предприятия различной специфики: предприятия топливно-энергетического комплекса, добычи полезных ископаемых, обрабатывающие производства, легкая промышленность, машиностроительные и химические предприятия, которые оказывают негативное воздействие на окружающую среду (Доклад ..., 2023). Город при этом является одним из центров химической промышленности России.

Крупные предприятия расположены на левом берегу реки Томь, в старой части Центрального района (рисунок 2.6.1). Промплощадка ГРЭС с восточной стороны примыкает к Кузнецкому проспекту, а также ограничена с южной – стороны ул. Станционная, с западной – граничит с ПАО «Кокс» и северной ограничена рекой Томь (Проект ..., 2018). Промплощадка коксохимического завода с восточной стороны граничит с Кемеровской ГРЭС, а также ограничена с южной – стороны ул. Станционная, с западной – граничит с промышленными складами, а с северной ограничена рекой Томь.

Выбор места строительства Кемеровской ГРЭС на берегу Томи определился двумя особенностями: дефицитом электрической мощности в ближайших экономических регионах, наличием удобных подъездных путей.

Строительство коксохимического завода определяется тем, что этот район оснащен железнодорожными путями, доступом каменного угля и промышленными предприятиями.

В городе также находятся две ТЭЦ, производство азотных удобрений, производство химической промышленности и механический завод.

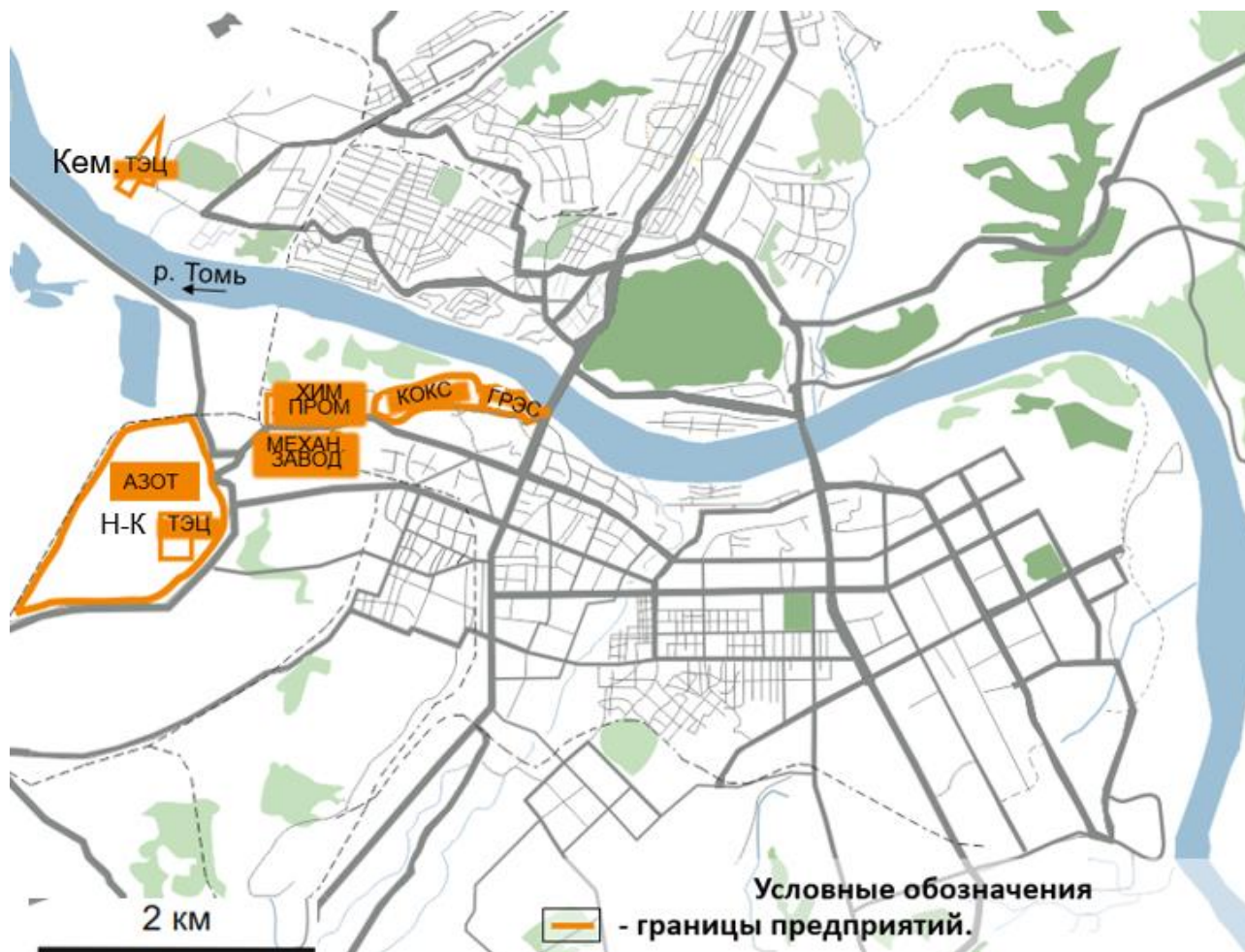


Рисунок 2.6.1 – Карта-схема расположения крупных предприятий на территории г. Кемерово (основа Яндекс.Карты с дополнениями автора)

Сформировавшиеся в центральной части города искусственные очаги тепла вызывают термический подсос и сток приземного воздуха с окраин в пониженную центральную часть, увеличивая загрязнение воздуха, которое становится значительным при ослабленном динамическом проветривании и температурной инверсии. Особенности рельефа влияют на уровень загрязнения атмосферного воздуха города: перемещение приземного воздуха осуществляется от окраин в

пониженную центральную часть, увеличивая степень загрязнения атмосферного воздуха.

Атмосферный воздух города исследовался на содержание бенз(а)пирена, аммиака, взвешенных веществ, водорода хлористого, оксида и диоксида азота, диоксида серы, оксида углерода, металлов, углерода (сажи), фенола и формальдегида (таблица 2.6.1).

Таблица 2.6.1 – Среднегодовые концентрации загрязняющих веществ в г. Кемерово в долях ПДК

Наименование загрязняющего вещества	Год			
	2016	2020	2022 ¹	2023 ¹
Бенз(а)пирен	2,1	2,9	5,5	2,0
Диоксид азота	1,0	0,8	0,8	0,9
Аммиак	0,6	0,7	0,6	0,7
Формальдегид	0,6	0,5	2,1	1,9
Взвешенные вещества	0,3	0,4	0,9	0,7
Оксид углерода	0,3	0,3	0,3	0,3
Оксид азота	0,4	0,3	0,3	0,4
Фенол	0,2	0,2	0,3	0,5
Водород хлористый	0,3	0,1	0,5	0,8
Углерод (сажа)	1,0	0,1	0,1	0,1
Диоксид серы	0,1	0,1	0,1	0,1

Примечание: ¹ – Среднегодовые концентрации определены в соответствии с СанПиНом 1.2.3685-21; данные Кемеровского ЦГМС – филиала ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС»

В целом за весь исследуемый период (2016-2023 гг.) превышения по среднегодовым концентрациям ПДК были по бенз(а)пирену от 2 до 5,5 раз и формальдегиду до 2,1 раз.

Всего выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух в 2022 году в Кемеровской области от стационарных источников 2653 предприятий составили 1593,312 тыс. т (в 2021 году – 1603,214 тыс. т от 2193 предприятий) (таблица 2.6.2). Анализ выбросов загрязняющих веществ от стационарных источников по видам

экономической деятельности за пятилетний период показал, что произошло увеличение объема выбросов в атмосферный воздух на предприятиях по добыче полезных ископаемых – на 174,541 тыс. т (20,8 %); обеспечению электрической энергией, газом и паром; кондиционированию воздуха – на 34,265 тыс. т (20,5 %); обрабатывающих производств – на 23,472 тыс. т (7,6 %) (Доклад ..., 2017). В 2022 году доля выбросов загрязняющих веществ от предприятий по добыче полезных ископаемых составила 63,7 % (1014,217 тыс. т), обрабатывающих производств – 20,8 % (330,708 тыс. т) и предприятий по обеспечению электрической энергией, газом и паром; кондиционированию воздуха – 12,7 % (201,792 тыс. т) (рисунок 2.6.1).

Таблица 2.6.2 – Динамика выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух от стационарных источников с учетом отнесения к предприятиям по видам экономической деятельности в Кемеровской области (Доклад ..., 2017, 2021, 2023).

Наименование вида экономической деятельности	Выброшено в атмосферный воздух ЗВ, тыс. т				Доля выбросов ЗВ, %
	2016г.	2020г.	2021г.	2022г.	2022г.
<i>Всего по городу, в том числе:</i>	1349,48	1611,82	1603,21	1593,31	100,0
Добыча полезных ископаемых	818,84	970,42	1085,22	1014,22	63,7
Производство и распределение электроэнергии	225,88 ²	146,49	173,33	20179	12,7
Обрабатывающие производства (включая коксохимический завод)	274,17	414,82	299,21	330,71	20,8
Транспорт и хранение	-	5,77	8,01	8,64	0,5
Сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	3,20 ³	4,33	3,77	3,64	0,2
Прочие виды экономической деятельности	27,39	70,01	34,07	34,31	2,1

Примечание: данные территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Кемеровской области; данные Южно-Сибирского межрегионального управления Росприроднадзора

Максимальное значение по выбросам диоксида серы (53,9 % и 38,9 %) приходилось на предприятия по обеспечению электрической энергией, газом и паром; кондиционированию воздуха и обрабатывающих производств

соответственно. Максимальное значение по выбросам оксида углерода (68,6 %) приходилось на предприятия обрабатывающих производств.

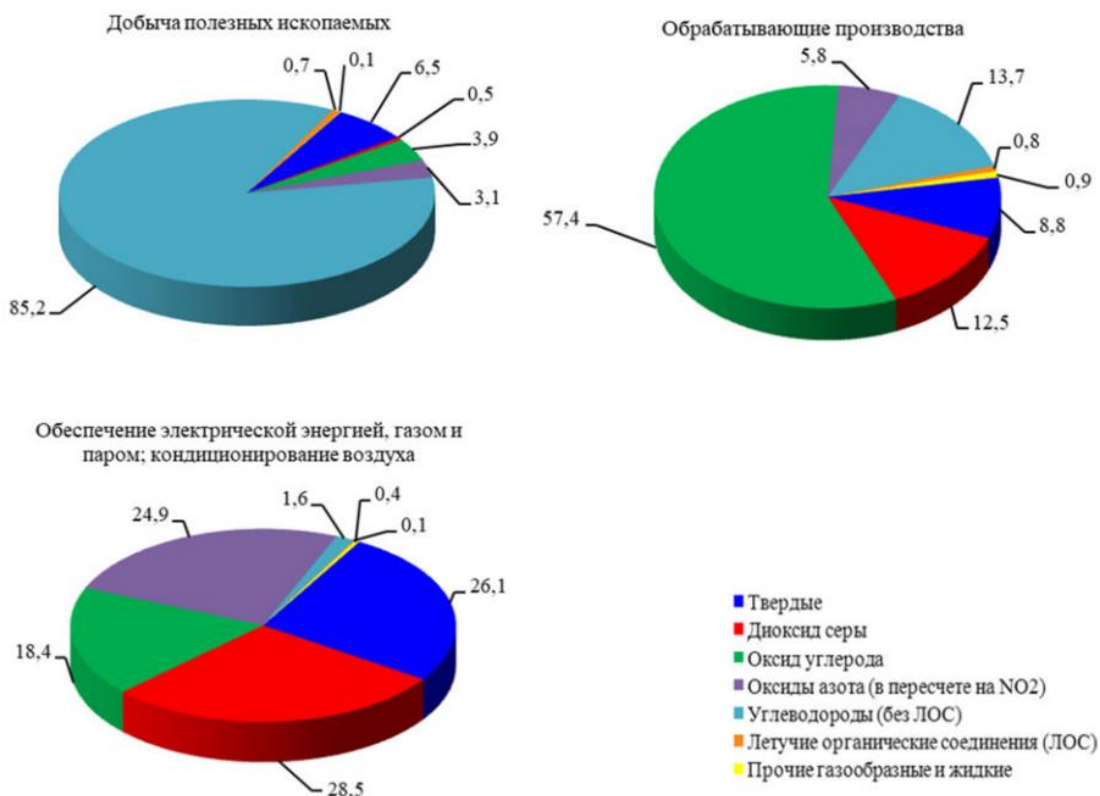


Рисунок 2.6.1 – Выбросы загрязняющих веществ стационарными источниками по видам экономической деятельности в 2022 г. (%; Доклад ..., 2023)

Кемеровская ГРЭС – один из наиболее крупных источников загрязнения атмосферного воздуха и других компонентов природной среды г. Кемерово. На территории действуют 55 источника выбросов. Общий объем валовых выбросов составляет 11306,563 т/год. Предприятие имеет 1 категорию опасности (Проект ..., 2018). Высота дымовых труб составляет 180 и 210 м.

Основной вид деятельности Кемеровской ГРЭС АО «Кемеровская генерация» является выработка и подача производственным и коммунально-бытовым потребителям двух видов энергии: тепловой – в виде горячей воды и водяного пара (под давлением 7, 13, 20 ата) и электрической.

На основании Постановления Главного государственного врача РФ от 07.08.2017 г. № 114 установлена СЗЗ промплощадки Кемеровской ГРЭС АО «Кемеровская генерация» и определены ее границы:

- север – 457 м от границы территории промплощадки;
- северо-восток – 548 м от границы территории промплощадки;
- восток – 514 м от границы территории промплощадки;
- юго-восток – 63 м от границы территории промплощадки;
- юг – 534 м от границы территории промплощадки;
- юго-запад – 466 м от границы территории промплощадки;
- запад – 500 м от границы территории промплощадки;
- северо-запад – 500 м от границы территории промплощадки.

Установленная электрическая мощность Кемеровской ГРЭС АО «Кемеровская генерация» составляет 485 МВт, установленная тепловая мощность – 1540 Гкал/час. Технологические показатели предприятий теплоэнергетики в г. Кемерово представлены в таблице 2.6.3. Основным видом топлива на Кемеровской ГРЭС считается каменный уголь. В год расходуется около 1 млн. тонн угля. Поставка угля с объектов Кемеровской области в следующих объемах:

1. Шахта «им. А.Д. Рубана» – 40%.
2. Разрез «Камышанский» – 35%.
3. Шахта «им. В.Д. Ялевского» – 25%.

Таблица 2.6.3 – Технологические показатели предприятий угольной теплоэнергетики в г. Кемерово (Схема ..., 2022)

		2016 г.	2020 г.	2022 г.	2023 г.
Отпуск тепловой энергии, тыс. Гкал	ГРЭС	2 524	2 263	2 710	2 650
	Н-К ТЭЦ	2 911	2 264	2 062	2 250
	Кем. ТЭЦ	724	683	985	953
Затрачено условного топлива, тыс. т у.т.	ГРЭС	1 042	850	915	779
	Н-К ТЭЦ	1 050	1 002	886	877
	Кем. ТЭЦ	158	147	199	190

Примечание: Н-К ТЭЦ – Ново-Кемеровская ТЭЦ, Кем. ТЭЦ – Кемеровская ТЭЦ

Средние содержания элементов в каменных углях Кузнецкого месторождения (г/т): Li – 14,8; Rb – 15,0; Cs – 1,6; Sr – 248; Be – 4,6; Sc – 3,9; Y – 15,4; Ga – 7,0; Ge – 0,9; Zr – 138; Hf – 2,1; La – 12,3; Ce – 24,7; Sm – 2,6; Eu – 0,64;

Tb – 0,43; Yb – 1,3; Lu – 0,34; Ta – 0,47; V – 14,7; Nb – 11,0; Ag – 0,05; Au – 0,0075; Sb – 0,26; Th – 3,3; U – 2,4 (Арбузов, 2007). Средняя зольность угля, сжигаемого на ГРЭС, составляет 17,0%, содержание серы – 0,35%, азота – 1,75%, массовая доля минеральных примесей – 2–4%, калорийность угля – 5160 ккал/кг. Характерные выбросы для ГРЭС г. Кемерово: азота диоксид, азота оксид, углерод (сажа), серы диоксид, углерода оксид, бенз(а)пирен, зола твердого топлива (Проект ..., 2018).

Ново-Кемеровская ТЭЦ – предприятие энергетики г. Кемерово (Каталог ..., 2024). В настоящее время установленная электрическая мощность Ново-Кемеровской ТЭЦ составляет 580 МВт, тепловая мощность – 1449 Гкал/час. Основным видом топлива станции является каменный уголь марки Д Кузнецкого угольного бассейна. В состав основного генерирующего оборудования входят: 9 котельных агрегатов ТП-87 паропроизводительностью 420 тонн в час, 8 турбинных установок. Первоначально была построена как часть завода азотных удобрений.

Кемеровская ТЭЦ – одна из старейших тепловых станций областного центра Кузбасса. Станция обеспечивает теплом и горячей водой Кировский и часть Рудничного района Кемерово (Каталог ..., 2024). В настоящее время установленная электрическая мощность Кемеровской ТЭЦ составляет 80 МВт, тепловая мощность – 749 Гкал/час. На электростанции установлено 8 котельных агрегатов паропроизводительностью от 85 до 220 тонн пара в час, а также 4 турбогенератора мощностью от 10 до 30 МВт. Основным видом топлива Кемеровской ТЭЦ является каменный уголь Кузбасского угольного бассейна.

Кемеровский коксохимический завод – производитель металлургического кокса, один из крупнейших в России производителей и экспортеров металлургического кокса с производственной мощностью 3 млн тонн кокса в год. Валовый выброс вредных веществ предприятия в атмосферу в 2016 году составил 4387,628 тонн. Предприятие относится к объекту 1 категории негативного воздействия на окружающую среду. Нормативная санитарно-защитная зона – 1000 м.

Продукция предприятия – металлургический кокс – применим в домашних печах в качестве топлива и восстановителя железной руды. Это возможно

благодаря химическому вмешательству: а именно, удалению кислорода из оксида железа, который содержится в железной руде.

Коксохимический завод является самый мощный источник загрязнения атмосферного воздуха высокотоксичными и канцерогенными веществами, среди которых наибольший вклад вносят фтористые газообразные соединения (99,8 % от суммарного выброса аналогичного загрязняющего вещества по области), водород цианистый (99,4 %), кальций оксид (негашеная известь) (96,3 %), фенол (93,1 %), пыль неорганическая, с содержанием $\text{SiO}_2 > 70$ % (77,6 %), сероводород (60,1 %), бенз(а)пирен (47,5 %), аммиак (32,4 %), пыль неорганическая, с содержанием от 70 до 20 % SiO_2 (9,1 %).

Изучение токсичности выбросов (угольная пыль, сажа, нафталин, аммиак, сероводород, цианистый водород, бензол, фенол, пиридин) коксохимического производства происходило в период с 1976 по 2000 гг. (Зубицкий и др., 1997; Михайлуц и др., 1997). Ранее был проведен анализ онкологической заболеваемости рабочих Кемеровского АО «Кокс», который позволил выявить более высокие показатели среди тех рабочих, которые были непосредственно связаны с производственным процессом, по сравнению с контрольной группой из административного аппарата (2868 и 569). Доля заболевших злокачественными заболеваниями в опытной группе достоверно превышала таковую в контрольной группе в 1,7 раза, причем по злокачественным новообразованиям органов дыхания даже в 3 раза (Дудкина и др., 2011). Проведенные работы по оценке экологического риска позволили оценить опасность загрязнения атмосферного воздуха бенз(а)пиреном, формальдегидом, бензолом, сажей, взвешенными частицами и сероуглеродом в разных районах города для здоровья населения.

В целом по г. Кемерово экспозиционные дозы превышают допустимые значения по формальдегиду, бенз(а)пирену, саже и сероуглероду в 1,7-5,5 раз (Доклад ..., 2023). Суммарный популяционный канцерогенный риск от загрязнения атмосферного воздуха составляет 1,3 дополнительных случаев рака в год для всего населения города, а от загрязнения взвешенными частицами при среднегодовой концентрации 73 мкг/м^3 – 0,62 дополнительных случаев смерти в год на 1 тыс. чел.,

т.е. 290 случаев на все население в год, что является весьма значительной величиной (О санитарно-эпидемиологической ..., 1999). Вклад загрязненного атмосферного воздуха в смертность населения составляет 4,3%. Из этого количества 53 % приходится на взвешенные частицы, обусловленные выбросами химических производств.

Завод азотных удобрений «Азот» – основным видом деятельности Кемеровского АО «Азот» является производство и реализация химической продукции. В составе предприятия действуют основные цеха и производства, выпускающие следующую продукцию: аммиак; карбамид; аммиачную селитру; сульфат аммония; капролактамы; серную кислоту; угле-аммонийные соли; карбонаты; двуокись углерода жидкую; слабую азотную кислоту. Предприятие относится к объекту, оказывающему негативное воздействие на окружающую среду и присвоено ему 1 категория НВОС

С западной стороны от КАО «Азот» расположен поселок Пригородный, с восточной стороны – поселок Предзаводской. Ближайшая жилая застройка населенных пунктов от границ предприятия размещается следующим образом: с западной стороны – на расстоянии 75÷80 м (пос. Пригородный); с восточной стороны – на расстоянии 195÷200 м (пос. Предзаводской).

Размеры санитарно-защитной зоны для имущественного комплекса Кемеровское АО «Азот» установлены Постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 10.04.2017 № 51 и составляют в:

- северном направлении – 500 м от границы земельного отвода предприятия;
- северо-восточном направлении – 250 м от границы земельного отвода предприятия;
- восточном направлении – от 222 м до 980 м от границы земельного отвода предприятия;
- юго-восточном направлении – от 66 м до 242 м от границы земельного отвода предприятия;
- южном направлении – 250 м от границы земельного отвода предприятия;

- юго-западном направлении – 250 м от границы земельного отвода предприятия;
- западном направлении – от 82 м до 145 м от границы земельного отвода предприятия;
- северо-западном направлении – 50 м от границы земельного отвода шламонакопителя (расстояние от границы земельного отвода промышленной площадки КАО «Азот» до предложенной границы санитарно-защитной зоны в северо-западном направлении составляет 550 м).

Промышленные выбросы «Азота» составляют лишь 4 % от общего объёма выбросов в городе Кемерово.

ООО «Химпром» – крупное предприятие химической промышленности в России (Предприятие ..., 2024). Основными направлениями деятельности является хлорное производство и органический синтез:

- производство минеральных солей;
- производство хлора и его соединений;
- производство полиэфиров;
- производство окисей и их соединений.

Завод является ведущим поставщиком соды каустической, хлора, соляной кислоты для Западно-Сибирского региона. Значительный ассортимент поставляется в прочие регионы России и страны СНГ.

Механический завод – входит в концерн «Техмаш» корпорации «Ростех» (Кемеровский ..., 2024). Производит боеприпасы мелкого и среднего калибра, а также товары гражданского назначения, включая оборудование для угольных шахт (копры, детали), спорттовары, сувениры и сельхозоборудование. Освоение производства военной продукции началось в 1941 году. Предприятие располагает полным циклом изготовления. Потенциально интересен производителям горнодобывающего оборудования и дистрибьюторам промышленных товаров.

По официальным данным (Доклад ..., 2023; 2024) в атмосферном воздухе города периодически наблюдаются превышения ПДК для таких веществ, как бенз(а)пирен, аммиак, взвешенные вещества, водород хлористый, оксид и диоксид

азота, диоксид серы, оксид углерода, металлов, углерод (сажи), фенол и формальдегид.

Эколого-геохимическая обстановка на территории г. Кемерово изучалась в отдельных районах в разные периоды. Изучалась зола листьев тополя в функциональных зонах города, где были определены высокие концентрации Br, Rb, Co относительно среднего уровня их содержания в листьях урбанизированных территорий Сибири (Юсупов и др., 2021; Юсупов, 2022). В лишайниках функциональных зон города выявлена ассоциация элементов (Al, Ba, Cr, Fe, Co, S, V, Cu, Cd), связанная с влиянием выбросов тепловых электростанций и производства азотных удобрений, выхлопами автомобилей (Баумгертнер, 2011; Романова, 2012; Kotov et al., 2021; Zinicovscaia et al., 2024). На основе изучения видового разнообразия растительности, выявлена преобладающая сегетально-рудеральная растительность, что свидетельствует о нарушенных человеком группы растений (березы, осины, сорные виды растений) (Просьянникова, 2005).

Почвенный мониторинг затронул территорию Кемеровского района, где обнаружено максимальное содержание мышьяка в сравнении с другими территориями Кемеровской области (Шульгин и др., 2017).

По снежному покрову определен уровень пылевой нагрузки ($306 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$), который соответствовал высокому уровню загрязнения, и превышение фона по среднесуточному выпадению из атмосферы в рядах химических элементов (Cr, Pb, Na, Mg, Fe, Cu, K, Mn) (Бояркина и др., 1993). Определена мезомасштабная корреляция ряда элементов (Cl, K, Ca, Mn, Fe, Ni, Ga, Ge, Se, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Pb, Bi, Th, U) в снежном покрове, которая характерна для г. Кемерово в сравнение с другими изучаемыми промышленными центрами области (Павлов и др., 2007). Экспериментальными исследования снежного покрова и методами моделирования выявлено, что полиароматические углеводороды распространяются на десятки километров от г. Кемерово в направлении господствующего переноса воздушных масс, сохраняя при этом высокие концентрации в снежном покрове за пределами города (Рапута и др., 2008; 2011). В выше представленных исследованиях фиксировался недостаток данных о

масштабе и характере аэротехногенного воздействия предприятий сжигания и переработки угля на основе анализа снежного покрова на всей территории города.

С 1985 по 2004 гг. были проведены исследования в г. Кемерово о зависимости валовых выбросов коксохимического завода и заболеваемости населения злокачественными образованиями. За этот промежуток времени объемы валовых выбросов от коксохимического завода колебались от 4,6 до 7,5 тыс. т в год. В результате проведенного анализа было определено, что стандартизированные показатели заболеваемости населения некоторыми злокачественными новообразованиями имеют прямые положительные корреляционные связи с объемами валовых выбросов в атмосферный воздух коксохимического завода, но со сдвигом в различные интервалы времени. Высокие коэффициенты корреляции выявлены для злокачественных новообразований раком легкого, желудка, кожи только у мужчин и только у женщин в щитовидной железе, молочной железе и яичниках (Ларин, 2013).

Таким образом, г. Кемерово характеризуется сложным сочетанием природно-климатических и техногенных факторов, способствующих накоплению загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы и на подстилающей поверхности.

Выявлено, что существующая система мониторинга атмосферного воздуха фиксирует превышение ПДК по загрязняющим веществам, включая и твердые частицы, но не дает полного представления о пространственном распределении и химическом составе поллютантов, особенно в зимний период, когда дополнительно возрастает техногенная нагрузка на территорию за счет интенсификация работы предприятий теплоэнергетики, наблюдаются частые атмосферные инверсии и слабый ветровой режим, которые способствуют накоплению загрязнителей в компонентах природной среды.

Существующие данные свидетельствуют о наличии специфических загрязнителей в компонентах природной среды (угольная пыль, сажа, тяжелые металлы, ПАУ), но комплексные исследования твердых частиц, осевших из воздуха

в снежный покров, на всей территории города и в районах с привязкой к источникам выбросов предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии в полной мере не проводились.

Анализ литературных данных показал, что ранее проводившиеся эколого-геохимические исследования на территории г. Кемерово были фрагментарными и не создали целостной картины пространственно-временного аэротехногенного загрязнения.

Таким образом, существует острая необходимость в проведении системных исследований снежного покрова для оценки современных масштабов и структуры загрязнения атмосферы г. Кемерово выбросами предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии.

Глава 3. Методика и методы исследования

3.1 Методика отбора и подготовки проб снежного покрова

Исследование основано на анализе 68 проб снежного покрова, отобранных и подготовленных лично автором в период 2020-2023 гг. и совместно с сотрудниками отделения геологии ИШПР ТПУ в 2016 г. (Филимоненко Е.А., Володина Д.А.) на территории г. Кемерово.

Отбор проб снежного покрова производился на территории г. Кемерово (рисунок 3.1.1) в соответствии с утвержденными методиками (Назаров и др., 1976; 1978; Методические рекомендации ИМГРЭ..., 1982; 2006; Василенко и др., 1985; Геохимия..., 1990), руководством по контролю загрязнения атмосферы (РД 52.04.186-89), также с учетом многолетнего опыта специалистов отделения геологии ТПУ (Шатилов, 2001; Язиков, 2006; Рихванов и др., 2006; Таловская, 2008; 2022; Филимоненко, 2015; Шахова, 2018). Выбор времени отбора (конец февраля) обусловлен климатическими особенностями региона и необходимостью зафиксировать максимальное накопление влаги и загрязняющих веществ в снежном покрове.

В 2016 и 2023 годах точки располагались по векторной системе на северо-восток и юго-запад на расстоянии от 0,5 до 4,5 км от основных источников загрязнения – предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства, а также в южной части города, удаленной от источников загрязнения (рисунок 3.1.1; таблица 3.1.1). В 2020 и 2022 годах применялась площадная система опробования в масштабе 1:50000 на всей территории города, со сгущением или разряжением сети наблюдений.

Планирование точек отбора проб выполнялось с учетом следующих требований: 1) следование методическим указаниям ИМГРЭ по эколого-геохимической оценке загрязнения территории городов (1982; 1990); 2) главенствующее направление ветра; 3) расположение предприятий теплоэнергетики и химической промышленности в городе; 4) высота промышленных труб (расстояние между точками от источников – 10-40

эффективных высот факела в соответствии с РД 52.04.186-89); 5) размеры границ санитарно-защитных зон предприятий; 6) удаленность точек от автодорог на 20-25 м; 7) доступность к каждой точке отбора проб.



Рисунок 3.1.1 – Карта-схема отбора проб снежного покрова на территории г. Кемерово

Таблица 3.1.1 – Сведения о системе отбора и количестве проб снежного покрова на территории г. Кемерово в период исследований

Год	Система отбора	Количество проб
2016	Векторная, площадная	22
2020	Площадная	14
2022	Площадная	23
2023	Векторная	9
Всего проб:		68

Пробы снежного покрова были отобраны методом шурфа на всю глубину залегания покрова, кроме 5 см над почвенным слоем во избежание попадания грунта в отобранные пробы. Далее пробы складывались в полиэтиленовые пакеты пластмассовыми лопатками и завязывались, и фиксировались номерами проб. С помощью рулетки измерялись глубина, ширина и длина шурфа. А также рассчитывалась продолжительность (в сутках) периода снегонакопления до момента отбора проб. Вес каждой пробы составлял в 16-17 кг снега (общим весом всех проб около 1000 кг).

В дальнейшем проводилась многоэтапная работа по подготовке каждой пробы к лабораторно-аналитическим анализам. Подготовительный этап начинался с таяния снега при комнатной температуре в пластиковых тазах. Из полученной снеготалой воды с помощью пинцета удалялись крупные частицы. С помощью полиэтиленовой трубки верхнюю часть отстоянной воды декантировали и фильтровали нижнюю часть снеготалой воды (1,5-2 литра) через заранее взвешенный беззольный фильтр «синяя лента». Из отдельных проб брали аликвоту декантированной воды для последующего химического анализа. После фильтрации снеготалой воды, осадок на фильтре просушивали при комнатной температуре. Далее осадок просеивали через сито с размером ячейки 1 мм для удаления случайных примесей, после чего взвешивали вместе с фильтром. Массу нерастворимого осадка снежного покрова вычисляли как разницу между массой фильтра до и после процедуры фильтрования. Общая схема подготовки проб представлена на рисунке 3.1.2.

В результате проведенных процедур отбора и подготовки основным объектом последующего исследования стала нерастворимая фракция (нерастворимый осадок) снежного покрова, сформированная аэрозольными частицами, осевшими из атмосферного воздуха в снежном покрове.

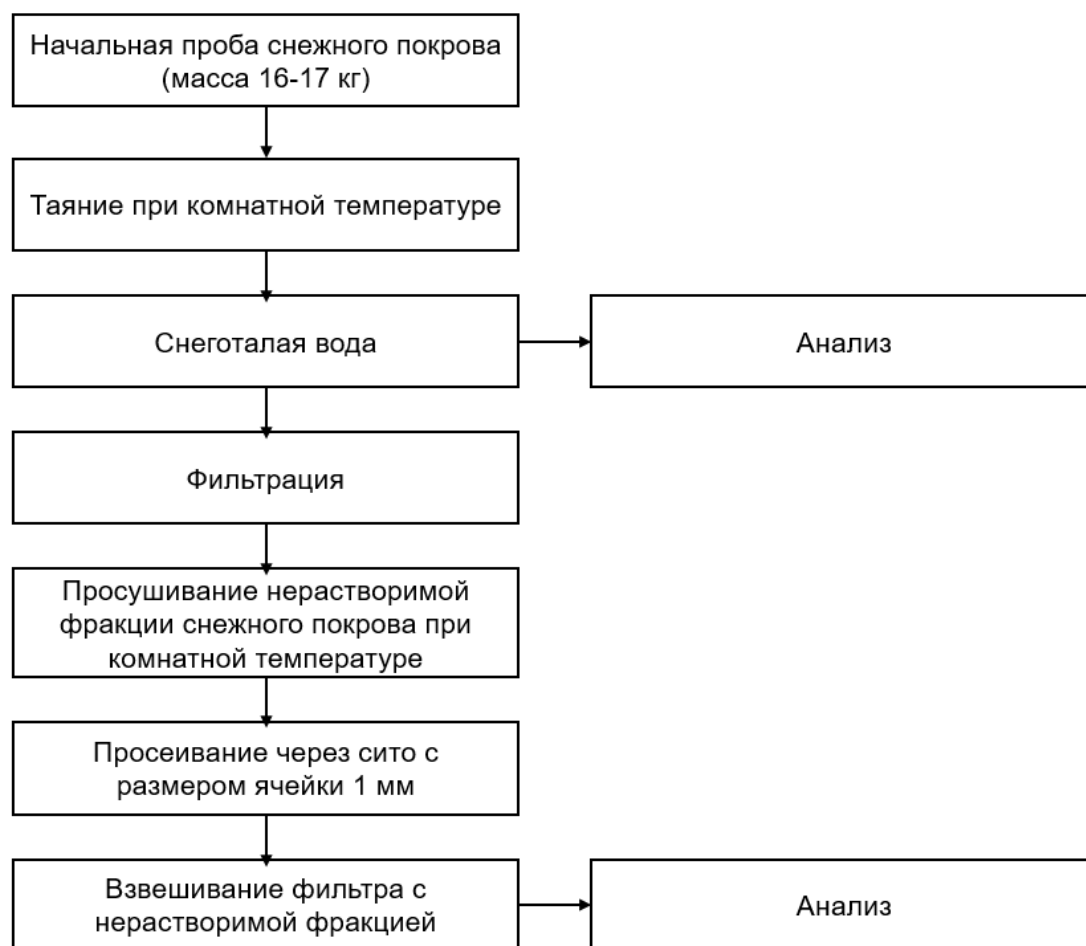


Рисунок 3.1.2 – Схема подготовки и изучения проб снежного покрова

3.2 Аналитические методы исследования

Лабораторно-аналитические исследования проб нерастворимой фракции снежного покрова проводились с применением комплекса современных методов анализа с использованием оборудования центра коллективного пользования Исследовательского реактора теплового-Томского (УНУ ИРТ-Т) и Международного инновационного научно-образовательного центра «Урановая геология» (МИНОЦ «Урановая геология») на базе отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Отдельные пробы жидкой фазы снежного покрова (снеготалая вода) были проанализированы в аккредитованных лабораториях г. Томска.

Дополнительно изучался состав золы уноса с дымовых труб (предоставлена на ГРЭС), использовались данные по химическому составу угля (выданы С.И.

Арбузовым, профессором ОГ ИШПР ТПУ) для сравнительного анализа с нерастворимой фракцией снежного покрова.

Количество и тип проб, методы исследования представлены в таблице 3.2.1.

Центр коллективного пользования УНУ ИРТ-Т ТПУ

1. Инструментальный нейтронно-активационный анализ

Инструментальный нейтронно-активационный анализ (ИНАА) на 28 химических элементов (Ca, Na, Fe, As, Zn, Nd, Cr, Co, Sb, Br, Ba, Rb, Cs, Sr, Hf, Ta, Sc, Tb, Sm, Eu, La, Ce, Yb, Lu, U, Th, Au, Ag) выполнен с облучением тепловыми нейтронами на исследовательском реакторе ИРТ-Т при Томском политехническом университете по аттестованным методикам (НСАМ 510-ЯФ, 2016) в аккредитованной лаборатории (аналитики: А.Ф. Судыко, Л.В. Богутская). Изучено 68 проб нерастворимой фракции снежного покрова, три пробы золы уноса с ГРЭС г. Кемерово (таблица 3.2.1).

Для анализа достаточно от 50 до 100 мг пробы. Материал упаковывают в конвертики из фольги, куда наносится шифр пробы гелиевой ручкой.

Пробы облучают в реакторе постоянным потоком нейтронов. Продолжительность облучения проб составляет от 10 до 20 часов. Плотность потока тепловых нейтронов в канале облучения составляла $2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(см²·с). Данный метод основан на регистрации излучения радиоактивных нуклидов, образующихся при облучении исследуемых проб потоком нейтронов. Одновременно с исследуемыми пробами в тех же условиях облучались и стандартные образцы ((ГСО 7126-94) состава байкальского ила (БИЛ-1)). По окончании облучения пробы выдерживались некоторое время и после спада активности направлялись на анализ. Пределы обнаружения химических элементов в компонентах природной среды методом ИНАА приведены в таблице 3.2.2.

Таблица 3.2.1 – Методы исследования нерастворимой фракции снежного покрова и снеготалой воды на территории г. Кемерово, золы уноса ГРЭС

Аналитический центр, организация	Метод исследования (компонент)	Количество проб			Итого проб по методу исследования
		Нерастворимая фракция снежного покрова	Зола уноса	Снеготалая вода	
Центр коллективного пользования УНУ ИРТ-Т Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск)	Инструментальный нейтронно-активационный анализ (28 х.э.)	68	3	-	71
Международный инновационный научно-образовательный центр «Урановая геология», Национальный исследовательский Томский политехнический университет (г. Томск)	Атомно-абсорбционная спектрометрия (Hg)	52	3	-	55
	Микроскопический метод (природные и техногенные образования)	54	-	-	54
	Рентгенофазовый анализ (кристаллические и аморфные фазы)	6	1	-	7
	Электронная сканирующая микроскопия (микрочастицы)	11	-	-	11 (147 частиц)
Химико-аналитический центр «Плазма» (г. Томск)	Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (от Li до U)	-	-	11	11
Аккредитованная лаборатория (г. Томск)	Ионная хроматография (органические компоненты)	-	-	5	5

Таблица 3.2.2 – Пределы обнаружения содержания химических элементов в различных компонентах природной среды методом ИНАА (Рихванов и др., 2006)

Элемент	Предел обнаружения, мг/кг	Элемент	Предел обнаружения, мг/кг
Na	200	Ta	0,05
Ca	300	Sc	0,02
Fe	100	Tb	0,05
As	1,0	Sm	0,01
Co	0,1	Eu	0,01
Cr	0,2	La	0,03
Sb	0,2	Ce	0,05
Ba	8,0	Yb	0,1
Zn	2,0	Nd	1,0
Br	0,3	Lu	0,01
Rb	0,6	U	0,1
Cs	0,3	Th	0,2
Sr	7,0	Au	0,01
Hf	0,01	Ag	0,5

Метод ИНАА повсеместно применяется для анализа компонентов природной среды, включая нерастворимую фракцию снежного покрова (Шатилов, 2001; Языков, 2006; Рихванов и др., 2006; Таловская, 2008; 2022; Филимоненко, 2015; Судыко, 2016; Шахова, 2018).

МИНОЦ «Урановая геология» на базе отделения геологии инженерной школы природных ресурсов ТПУ

2. Атомно-абсорбционная спектрометрия

Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААСМ) проводилась в учебной лаборатории с помощью анализатора ртути РА-915+ с приставкой ПИРО-915+ и использованием пакета программ RA915P (консультанты: к.х.н., доцент Н.А. Осипова, к.г.-м.н. Е.А. Филимоненко) в соответствии с аттестованными методиками и стандартными образцами сравнения (ПНД Ф 16.1:2.23-2000; М 03-05-2005).

Исследуемый образец массой 20-50 мг взвешивают и помещают в ложечку-дозатор. Ложечка-дозатор вводится в печь (приставку ПИРО-915+). Результаты интегрируем на компьютере как самый большой пик и фиксируем концентрацию ртути в образце.

Диапазон измерений данного метода для массовой доли общей ртути в пробах составляет от 1 до 10000 мкг/кг. Для каждой пробы было проанализировано по 2 навески, результирующей величиной являлось среднеарифметическое двух измерений. Предел обнаружения ртути в нерастворимой фракции снежного покрова составляет 0,005 мг/кг.

Всего проанализировано 52 пробы нерастворимой фракции снежного покрова, а также три пробы золы уноса с ГРЭС.

3. Микроскопический метод

Исследование минерально-вещественного состава нерастворимой фракции снежного покрова проводилось с использованием бинокулярного стереоскопического микроскопа марки Leica ZN 4D с видеоприставкой. Всего было изучено 54 пробы нерастворимой фракции снежного покрова.

В ходе анализа проб проводилась микроскопическая идентификация типов частиц природного и техногенного происхождения в соответствии с патентом № 2229737 (2004 г.; авторы: Е.Г. Язиков, А.Ю. Шатилов, А.В. Таловская). Для этого использовалась эталонная коллекция, составленная по результатам многолетних исследований сотрудников отделения геологии ИШПР ТПУ. В коллекцию вошли характерные для нерастворимой фракции снежного покрова природные и техногенные частицы, представленные в научных работах (Шатилов, 2001; патент № 2229737, 2004; Язиков, 2006; Таловская, 2008; 2022; Язиков и др., 2010; Филимоненко, 2015).

На следующем этапе, методом сравнения с эталонными образцами, определяли процентное содержание каждого типа частиц в пробе. Затем вычисляли доли групп природных и техногенных частиц, приводя общую сумму всех выявленных компонентов к 100 %.

4. Электронная сканирующая микроскопия

Изучение проб проводилось на электронном сканирующем микроскопе S-3400N фирмы Hitachi с энергодисперсионной приставкой фирмы Bruker. Изучено 147 микрочастиц в 11 пробах нерастворимой фракции снежного покрова из зоны влияния предприятий теплоэнергетики и районов, удаленных от их влияния. Работы выполнялись под руководством к.г.-м.н., старшего преподавателя ОГ ИШПР С.С. Ильенка, ассистента А.П. Зайченко.

Подготовка проб включала нанесение образца на углеродный скотч площадью 25 мм². Анализ выполняли в условиях низкого вакуума при ускоряющем напряжении 20 кВ в режиме детектирования обратно-рассеянных электронов. Разрешающая способность микроскопа составляет до 3 нм, что позволяет получать высококачественные изображения. Обработку спектров и полуколичественный анализ элементного состава (погрешность 10–15 %) проводили с использованием программного обеспечения «EDAX Esprit». Поверхность пробы была разделена на 6 областей и исследована с помощью сканирующего электронного микроскопа при 200-кратном увеличении. Для анализа было отобрано 147 отдельных частиц, каждая из которых характеризовалась размером, морфологией и элементным составом.

На основе данных о морфологии и полуколичественном содержании элементов (масс.%) в частицах, выделены минеральные и техногенные микрочастицы. Минеральные частицы идентифицировали путём сравнения элементного состава с данными минералогических баз. К техногенным микрочастицам отнесены микросферулы различного состава и металлосодержащие микрочастицы, виды и типы которых охарактеризованы в публикациях (Miler et al., 2015; Talovskaya et al., 2018; Таловская, 2022). Количественное содержание микрочастиц оценивали путём расчёта среднего процентного соотношения для каждого типа частиц по результатам анализа всех шести полей зрения. Представленный подход для изучения микрочастиц в снежном покрове и оценки частоты их встречаемости в пробах используется рядом исследователей (Шевченко, 2006; Miler et al., 2015; Talovskaya et al., 2018; Таловская, 2022).

5. Рентгенофазовый анализ

Рентгенофазовый анализ проб проводился на дифрактометре Bruker Phaser D2. Исследовано 6 проб нерастворимой фракции снежного покрова и проба золы уноса ГРЭС. Работы выполнялись под руководством к.г.-м.н., доцента ОГ ИШПР Б.Р. Соктоева.

Исследуемый образец массой 0,5-2 г измельчают в агатовой ступке до состояния пудры, засыпают в обработанную спиртом кювету и разравнивают предметным стеклом до создания ровной поверхности.

Установив кювету в держатель прибора, регистрировали дифрактограмму в диапазоне углов $3\text{--}70^\circ 2\theta$ со скоростью сканирования $3^\circ/\text{мин}$ и шагом $0,02^\circ 2\theta$; общее время записи одной дифрактограммы составляло около часа. Полуколичественный минералогический анализ рентгеновских дифрактограмм был проведен с использованием программного обеспечения Diffrac.Eva.V3.2, на основе калибровочных кривых, полученных из различных стандартных образцов с известной минеральной композицией.

На рисунок 3.2.1 в качестве примера приведена дифрактограмма, получаемая в результате изучения проб рентгенофазовым методом.

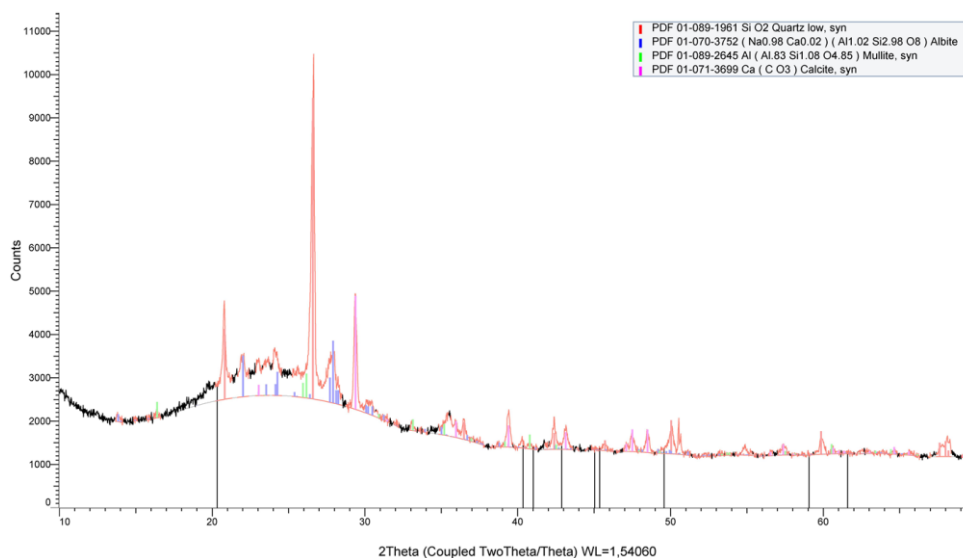


Рисунок 3.2.1 – Пример дифрактограммы исследуемой пробы нерастворимой фракции снежного покрова

По горизонтальным осям графика отображаются значения углов съемки (углы падения рентгеновского луча), по вертикали – интенсивность, то есть

количество отраженных от дифрактометра лучей. Кристаллическая фаза была определена на основе пропорции отраженных интенсивностей рентгеновского излучения, в то время как аморфная (некристаллическая) фаза определялась пропорцией разностью общей фазы в кристаллических концентрациях.

Химико-аналитический центр «Плазма», г. Томск

6. Масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой

Исследование проб жидкой фазы снега выполнялось методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на приборе Elan модели DRC-e (№ W1520501, производитель – PerkinElmer Instruments LLC, США) в аккредитованной лаборатории (директор: Н.В. Федюнина).

Всего изучено 11 проб снеготалой воды, полученных в ходе исследований в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимического производства.

Данный метод позволяет определить содержание 64 химических элементов (Li, Be, B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Se, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Bi, Th, U).

Исследования снеготалой воды были проведены в соответствии с ГОСТ Р 56219-2014 (ИСО 17294-2:2003).

Аккредитованная лаборатория, г. Томск

7. Ионная хроматография

Исследование отдельных проб снеготалой воды проведено с помощью ионной хроматографии в аккредитованной лаборатории. Отбор и подготовка проб снежного покрова включала следующие операции: после полного оттаивания из общего объема отбирали 1 литр снеготалой воды, который переливали в специализированную емкость из темного стекла. Затем пробу транспортировали в лабораторию с соблюдением срока не более трех суток. Всего исследовано 5 проб снеготалой воды, полученных в ходе исследований в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимического производства.

3.3 Обработка результатов исследования

Обработка аналитических данных нерастворимой фракции снежного покрова и снеготалой воды заключалась в расчете эколого-геохимических показателей, проведения статистического анализа с помощью программы «Statistica 8.0», построении карт-схем в ПО «Surfer» (метод Natural Neighbor) и ПО «CorelDraw».

Расчет эколого-геохимических показателей выполнялся в соответствии с методическими рекомендациями ИМГРЭ (Методические ..., 1982; Геохимия ..., 1990) и опубликованной литературой (Шатилов, 2001; Языков, 2006, Таловская, 2008; 2022; Касимов и др., 2012; 2016; Филимоненко, 2015).

По данным снегового опробования (дата отбора проб и начало снегостава, вес нерастворимой фракции снежного покрова, параметры площади шурфа), производился расчёт пылевой нагрузки по формуле 3.3.1:

$$P_n = \frac{P_o}{S \times t} \quad (3.3.1)$$

где P_n – величина пылевой нагрузки, мг/(м²·сут.); P_o – вес нерастворимой фракции снежного покрова, мг; S – площадь снегового шурфа, м²; t – количество суток от начала снегостава до дня отбора проб.

В дальнейшем полученные значения сопоставляются с принятой градацией (Методические ..., 1982; Геохимия ..., 1990) и градацией относительно фона для юга Западной Сибири (Таловская, 2022) для установления уровней загрязнения.

Таблица 3.3.1 – Градация уровней загрязнения территории по уровню пылевой нагрузки (мг/(м²·сут.)) и суммарного показателя загрязнения (Z_c) на основе изучения снежного покрова

Величина пылевой нагрузки, мг/(м ² ·сут.)		Z_c^*	Уровень загрязнения
Рекомендации ИМГРЭ*	Относительно фона**		
менее 250	20-60	менее 32	низкий
251–450	60-240	32-64	средний
451–850	240-600	64-128	высокий
более 851	более 600	более 128	очень высокий

Примечание: * – Методические ..., 1982; Геохимия ..., 1990; ** – Таловская, 2022

Коэффициент концентрации (K_c), который показывает отношение содержания элемента в пробе к его фоновому содержанию, рассчитывается по формуле 3.3.2:

$$K_c = \frac{C}{C_{\text{ф}}} \quad (3.3.2)$$

где K_c – коэффициент концентрации; C – содержание элемента в пробе, мг/кг; $C_{\text{ф}}$ – фоновое содержание элемента, мг/кг.

Для сравнительного анализа использовались опубликованные фоновые концентрации химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова юга Западной Сибири, полученные в ходе предыдущих исследований методами ИНАА (Шатилов, 2001; Языков, 2006; Таловская, 2022), ААСМ (Филимоненко, 2015; Таловская, 2022) (таблица 3.3.2).

Таблица 3.3.2 – Фоновые содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова (по данным ИНАА и ААСМ), мг/кг

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Na	0,2	Sr	100	Nd	14,9
Ca	0,8	Sc	7,1	Ta	0,2
Fe	1,9	Br	2,9	Sm	0,6
Hg	0,08	Rb	55,0	Eu	1,1
Zn	139	Cs	3,5	Tb	0,06
Sb	2,3	La	2,8	Yb	0,2
Co	10,3	Hf	2,2	Lu	0,2
Cr	110	Au	0,2	Th	2,9
Ba	100	Ce	10,3	U	0,2

Примечание: Na, Ca, Fe в %; данные: Шатилов, 2001; Языков, 2006; Филимоненко, 2015; Таловская, 2022

После расчета составляется геохимический ассоциативный ряд элементов с наибольшими K_c в порядке убывания.

Поскольку антропогенные аномалии чаще всего имеют полиэлементный состав, для них рассчитывается суммарный показатель загрязнения характеризующий эффект воздействия группы элементов (формула 3.3.3; таблица 3.3.1):

$$Z_c = \sum K_c - (n - 1), \quad (3.3.3)$$

где n – число учитываемых элементов с $K_c > 1,5$.

Кларки земной коры соответствовали рекомендациям для анализа данных эколого-геохимических исследований Н.С. Касимова (Касимов и др., 2015), включая кларки земной коры по Н.А. Григорьеву (2003 г.), для расчета фактора обогащения по формуле 3.3.4:

$$\Phi O = \frac{(C_x / C_{Sc})_{ТОС}}{(C_x / C_{Sc})_{з.к.}} \quad (3.3.4)$$

где C_x – содержание химического элемента в нерастворимой фракции снежного покрова (ТОС) и кларк этого химического элемента в земной коре (з.к.), мг/кг; C_{Sc} – содержание скандия в нерастворимой фракции снежного покрова и кларк скандия в земной коре (з.к.), мг/кг. Скандий выбран как реперный элемент, что обусловлено его низкой технофильностью и широкой распространенностью в земной коре.

Кларк концентрации рассчитывался как сравнение содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова с кларком ноосферы (Глазовский, 1982; Глазовская, 1988) по формуле 3.3.5:

$$KK = \frac{C}{K} \quad (3.3.5)$$

где KK – кларк концентрации; C – содержание элемента в пробе, мг/кг; K – кларк ноосферы, мг/кг.

Статистический анализ данных о пылевой нагрузке и элементном составе нерастворимой фракции снежного покрова проводился по общепринятым методикам обработки эколого-геохимической информации (Михальчук и Язиков, 2015). Рассчитаны основные дескриптивные статистики: среднее арифметическое, медиана, мода, стандартное отклонение, коэффициент вариации, эксцесс и асимметрия с их стандартными ошибками, а также минимальные и максимальные значения. Для последующего анализа в качестве средних величин использовались среднеарифметические значения, обеспечивающие несмещенную оценку математического ожидания как для нормального, так и для логнормального распределения (Шестаков, 1988; Шатилов, 2001).

Проверка соответствия распределения данных нормальному закону осуществлялась с использованием параметрического критерия Стьюдента. В случае отклонения от нормальности применялись непараметрические критерии Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса и Манна-Уитни. Дополнительно характер распределения оценивался по отношениям асимметрии (А) и эксцесса (Е) к их стандартным ошибкам ($E/\delta E \leq 3$ и $A/\delta A \leq 3$).

Для выявления геохимических ассоциаций элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и установления связей с составом золы уноса, углем (по данным С.И. Арбузова, профессора ОГ ИШПР ТПУ) и технологическими параметрами ГРЭС (потребление топлива на ГРЭС), метеопараметрами (температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность воздуха, количество осадков за зимний период) применен корреляционный анализ (коэффициенты Пирсона и Спирмена) и факторный анализ.

Эколого-геохимическое районирование территории города по геохимической специфике состава нерастворимой фракции снежного покрова выполнено с применением комплекса методов, включая факторный, кластерный (включая метод К-средних) и дисперсионный анализы.

Статистическую значимость различий в уровнях пылевой нагрузки и концентрации химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в выборках определяли с помощью критериев Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни, Краскелла-Уоллиса. Уровень значимости (p) интерпретировали по общепринятой шкале: $p \geq 0,1$ – незначимые, $0,1 > p \geq 0,05$ – слабозначимые, $0,05 > p \geq 0,01$ – значимые, $0,01 > p \geq 0,001$ – сильнозначимые, $p < 0,001$ – высокочисленные различия (Михальчук и Язиков, 2015). Силу корреляционных связей классифицировали по значениям коэффициентов корреляции (r) шкалы Харрингтона: $|r| < 0,2$ – очень слабая; $0,2-0,37$ – слабая; $0,37-0,63$ – средняя; $0,63-0,8$ – высокая; $0,8-1,0$ – очень высокая (Адлер, 1976).

На картах-схемах распределения концентрации химических элементов в пробах на территории г. Кемерово выделяли цветом ореолы, согласно методике выделения геохимических аномалий (формула 3.3.6):

$$m \pm (2,3,4) \cdot \sigma \quad (3.3.6)$$

где m – среднее содержание элемента в выборке; σ – стандартная ошибка. Все, что ниже рассчитанных значений, цветом не выделялось.

По результатам изучения минерально-вещественного состава нерастворимой фракции снежного покрова определялся уровень загрязнения территории по соотношению групп природных и техногенных образований, кристаллических (минеральных) и морфных фаз, отношению содержания минералов-индикаторов к кварцу в составе изучаемых проб в соответствии с типизацией урбанизированных территорий, предложенной А.В. Таловской (2022 г.).

Таким образом, в данной главе представлена методика отбора, подготовки и лабораторно-химического анализа 68 проб снежного покрова, выполненная при личном участии автора на территории г. Кемерово в период 2016-2023 гг., и трех проб золы уноса ГРЭС. Методика исследований базировалась на требованиях методических и нормативных документов, опубликованной научной литературе по теме диссертационной работы. Ключевым объектом исследования выступила нерастворимая фракция (нерастворимый осадок) снежного покрова, сформированная аэрозольными частицами, осевшими из атмосферного воздуха на подстилающую поверхность. Химический и минерально-вещественный анализ проб выполнялся в аккредитованных лабораториях Томского политехнического университета на современном высокоточном оборудовании по аттестованным методикам с помощью следующих методов: инструментальный нейтронно-активационный анализ, атомно-абсорбционная спектрометрия, сканирующая электронная микроскопия, рентгенофазовый анализ и микроскопический метод. Для исследования химического состава отдельных проб снеготалой воды применялись ионная хроматография и масс-спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой в аккредитованных лабораториях г. Томска. Обработка полученных фактических данных проводилась с применением эколого-геохимических, статистических и картографических методов в соответствии с общепринятыми методическими рекомендациями.

Глава 4. Уровень пылевой нагрузки на территорию г. Кемерово по данным снеговой съемки

4.1 Пространственное распределение пылевой нагрузки на территории

Уровень пылевой нагрузки на территории г. Кемерово изменяется от 15 до 610 мг/(м²·сут.) (таблица 4.1.1). Распределение пылевой нагрузки на территории города характеризуется логнормальным законом распределения согласно расчетам теста Колмагорова-Смирнова и отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (более 3 ед.).

Таблица 4.1.1 – Статистические параметры уровня пылевой нагрузки на территории г. Кемерово по данным снеговой съемки

n	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S
68	207	146	201	полимод.	15	610	152
δm	V	A	δA	E	δE	A/δA	E/δE
19	74	0,6	0,3	-0,5	0,6	2	-0,8

Примечание: n – объем выборки (количество проб), m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

Средний уровень пылевой нагрузки составил 207 мг/(м²·сут.), что соответствует среднему уровню загрязнения по градации относительно фона. Медианное значение (201 мг/(м²·сут.)) близко к среднему, что подтверждает симметричное распределение данных без значительных выбросов. Полимодальное распределение, то есть имеет несколько часто встречающихся значений, что соответствует территориям с разными источниками загрязнения. Коэффициент вариации составляет 74 %, такое распределение характеризуется как сильно неоднородное, что соответствует урбанизированным территориям с разнообразными источниками загрязнения.

По всей площади города выделены три ореола с разными уровнями пылевой нагрузки (рисунок 4.1.1). Уровни пылевой нагрузки в выделенных ореолах характеризуются между собой нормальным законом распределения (таблица 4.1.2; рисунок 4.1.2). Результаты теста Колмогорова-Смирнова и Лиллефорса статистически значимо отличаются от нормального закона распределения

($0,050 > p \geq 0,005$). Анализ показателей отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам ($A/\delta A$ и $E/\delta E$ менее 3 ед.) свидетельствует о нормальном распределении для всех выделенных ореолов с разным уровнем уровней пылевой нагрузки.

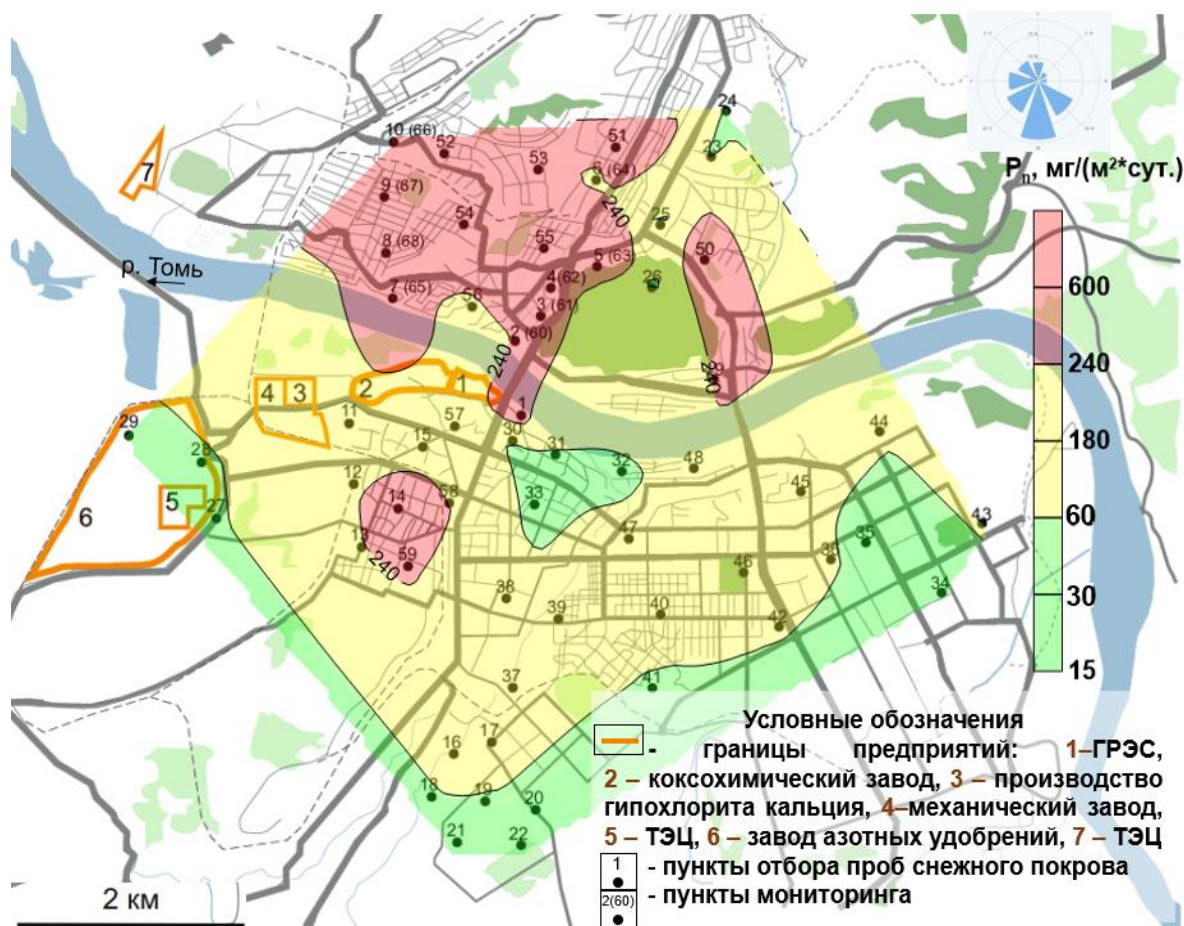


Рисунок 4.1.1 – Карта-схема распределения пылевой нагрузки на территории г. Кемерово по данным снеговой съемки («роза» ветров за зимний период, градация на шкале – Таловская, 2022)

Первый ореол имеет площадь 19 км^2 и отличается высоким уровнем пылевой нагрузки относительно фона ($240\text{--}600 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$). В данном ореоле находятся частный сектор и разно-уровневая застройка с преобладанием высокотажных жилых зданий. Пространственное расположение соответствует северной части города и начинается от $1,5 \text{ км}$ и достигает 4 км с подветренной стороны от предприятий теплоэнергетики и коксохимии, где происходит основной массоперенос загрязняющих веществ.

Таблица 4.1.2 – Статистические параметры выделенных ореолов на территории г. Кемерово по уровню пылевой нагрузки

Параметр	Ореол с низким уровнем пылевой нагрузки	Ореол со средним уровнем пылевой нагрузки	Ореол с высоким уровнем пылевой нагрузки
n	14	24	25
m	40,1	139	366
Xгеом	38,3	126	355
Xmed	45,2	132	345
Xmod	53	Полимод.	Полимод.
Min	18,5	64,6	253
Max	53,0	228	609
S	11,6	60,0	96,6
δm	3,1	12,2	19,3
V	28,8	43,2	26,4
A	-0,6	0,2	0,9
δA	0,6	0,5	0,5
E	-1,0	-1,8	0,0
δE	1,2	0,9	0,9
A/ δA	-1	0,4	1,0
E/ δE	0,8	2	0

Примечание: n – объем выборки (количество проб), m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение

Второй ореол площадью 66 км² характеризуется средним уровнем пылевой нагрузки (60-240 мг/(м²·сут.)). Ореол охватывает большую часть города с селитебными, рекреационными зонами и транспортными развязками.

Третий ореол площадью 12 км² с низким уровнем пылевой нагрузки относительно фона (20-60 мг/(м²·сут.)) находится преимущественно на периферии города, в частности в районе расположения завода по производству азотных удобрений в западном районе города, частной и малоэтажной застройки – в южной части города.

Анализ распределения уровня пылевой нагрузки относительно общепринятой градации (Методические ..., 1982; Геохимия ..., 1990) показал, что в городе преимущественно формируется низкий уровень загрязнения, а средние и высокие уровни выявлены в районах, расположенных по главенствующему направлению ветра от промышленных предприятий (рисунок 4.1.3).

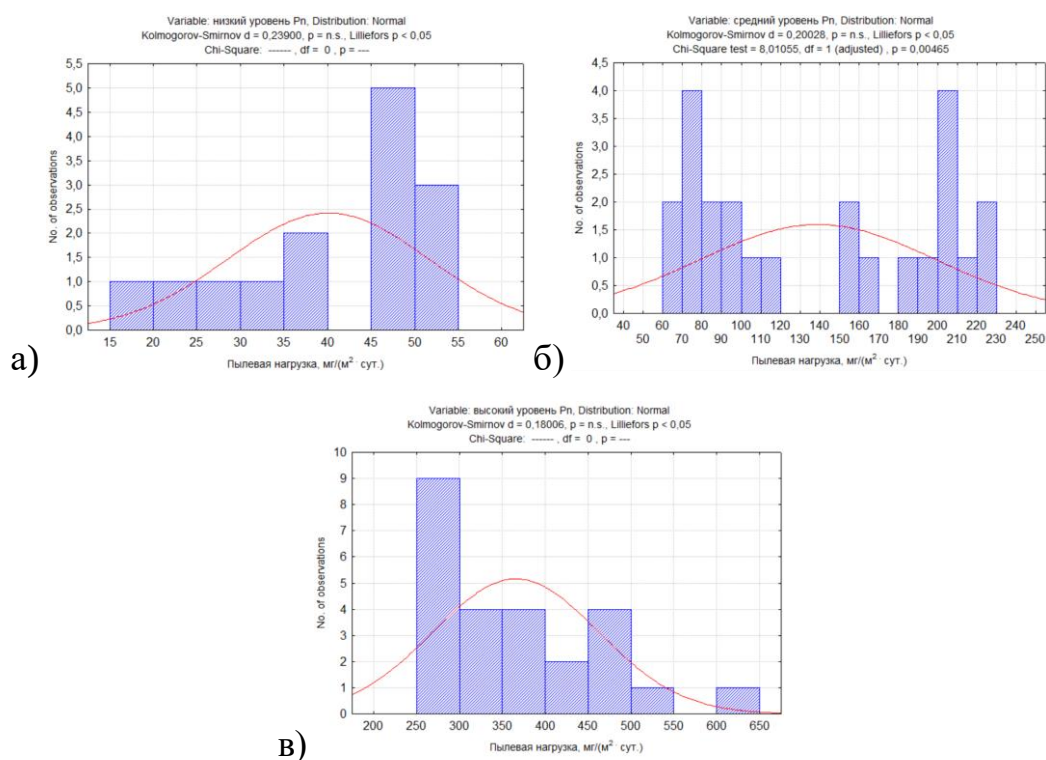


Рисунок 4.1.2 – Гистограммы распределения величин пылевой нагрузки в ореолах с низким (а), средним (б) и высоким (в) уровнями

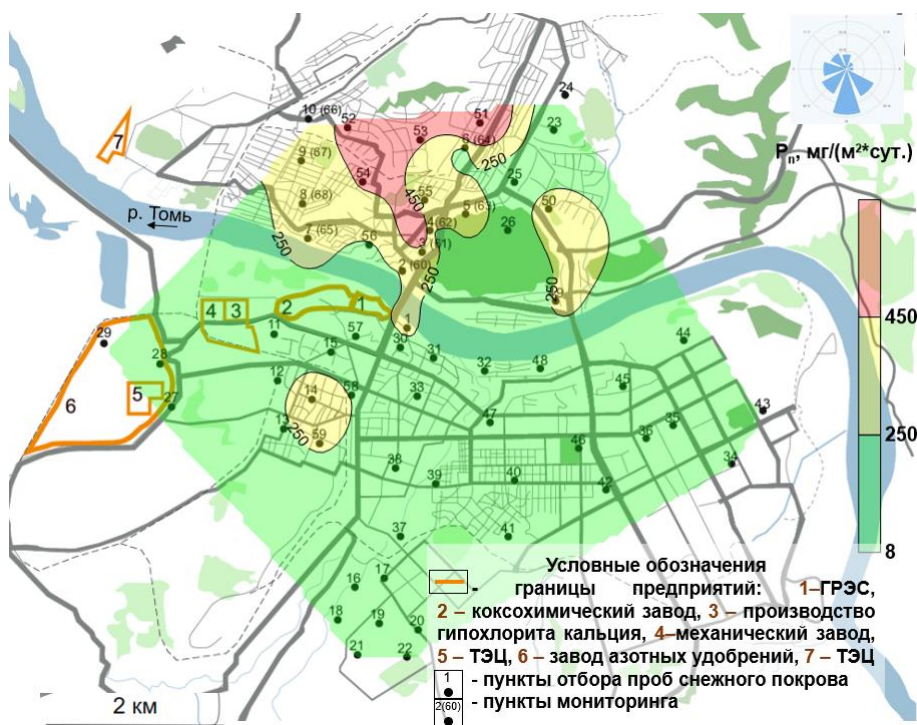


Рисунок 4.1.3 – Карта-схема распределения пылевой нагрузки на территории г. Кемерово по данным снеговой съемки в соответствии с общепринятой градацией («роза» ветров за зимний период, градация на шкале – Методические ..., 1982; Геохимия ..., 1990)

Формирование ореолов с высоким и низким уровнем пылевой нагрузки в северной части и на периферии города, соответственно, вероятно отражает влияние промышленности из центрального района города. Вблизи предприятий температура воздуха будет выше, чем на удалении от него из-за теплового воздействия самих предприятий, что приводит к образованию над ними «острова тепла», что способствует высокому накоплению загрязняющих веществ в окрестностях источников выбросов. Высокий уровень загрязняющих веществ в приземном слое воздуха в зимний период обусловлен не только интенсификацией антропогенных источников, но и воздействием характерных для этого периода приземных температурных инверсий, препятствующих эмиссии аэрозоля в вышележащие слои атмосферы (Li et al., 2017; Sadique et al., 2018). Дополнительно, на городскую атмосферную циркуляцию оказывает влияние ориентация и высоты зданий, плотность застройки, характер озеленения. В комплексе данные процессы приводят к формированию «шапки» загрязнений. Следовательно, вышеописанные механизмы городской локальной циркуляции в зимний период способствуют увеличению концентрации аэрозольных примесей в атмосферном воздухе, которые затем осаждаются на дневную поверхность и приводят к увеличению массы пыли в снежном покрове.

Уровень пылевой нагрузки в г. Кемерово имеет превышение от 1,5 до 7 раз в отличие от некоторых городов Кемеровской области (рисунок 4.1.4).

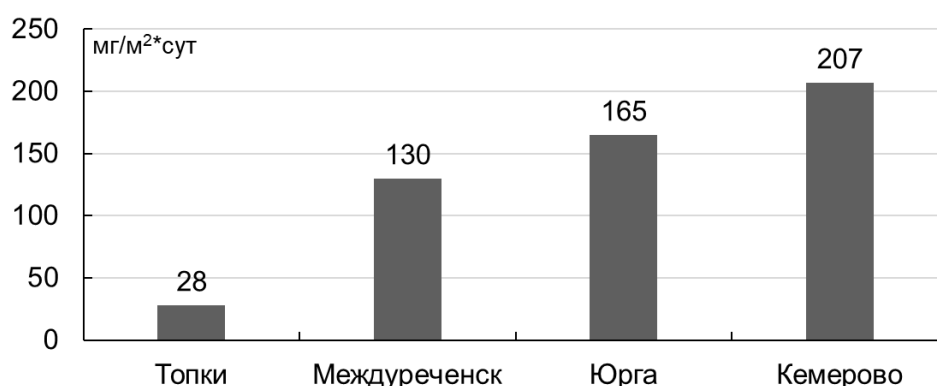


Рисунок 4.1.4 – Средние значения пылевой нагрузки в отдельных городах Кемеровской области (Топки – Володина, 2024; Междуреченск – Осипова и др., 2023; Юрга – Таловская, 2022; Кемерово – данные автора)

4.2 Динамика пылевой нагрузки в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии

В период наблюдений (с 2016 по 2023 гг.) в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии пылевая нагрузка в среднем варьируется от 245 до 380 мг/(м²·сут.), что соответствует высокому уровню загрязнения относительно фона (рисунок 4.2.1).

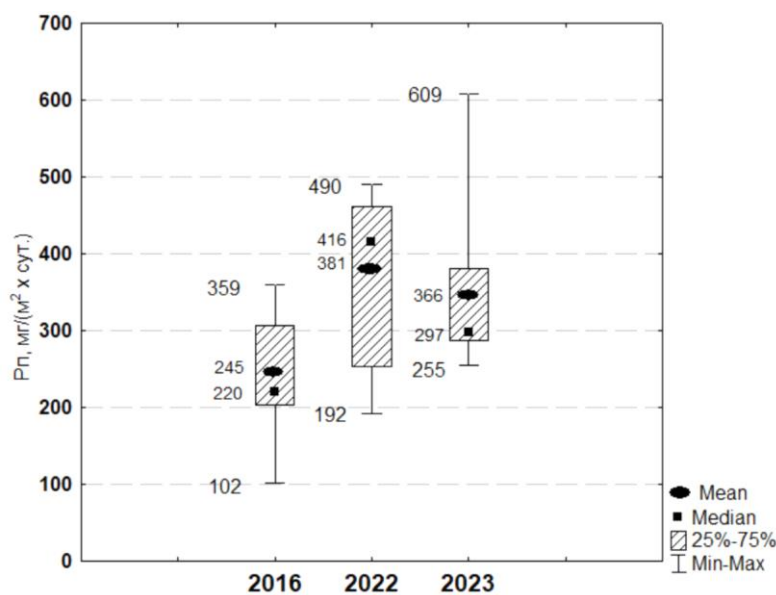


Рисунок 4.2.1 – Диаграмма размаха уровней пылевой нагрузки в 2016, 2022 и 2023 гг. по данным исследования снежного покрова в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово

Описательная статистика данных по пылевой нагрузке в период мониторинга в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии представлена в таблице 4.2.1.

По результатам корреляционного анализа выявлено, что метеопараметры оказали влияние на формирование пылевой нагрузки в течение мониторинга (таблица 4.2.2). При увеличении относительной влажности воздуха и количества осадков наблюдается рост пылевой нагрузки, при снижении скорости ветра уровень пылевой нагрузки также возрастает. Между пылевой нагрузкой и температурой воздуха выявлена слабая корреляционная связь. В работах (Li et al., 2001; L. Xu et al., 2017; W. Xu et al., 2017; Kuang et al., 2020) показано, что в условиях высокой относительной влажности воздуха твердые частицы сильнее

коагулируются, что приводит к быстрому осаждению загрязняющих веществ, и вымываются осадками.

Таблица 4.2.1 – Статистические параметры уровня пылевой нагрузки по годам в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово

Параметр	2016 г.	2022 г.	2023 г.
n	14	9	9
m	245	416	366
X _{геом}	233	381	350
X _{med}	220	427	297
X _{mod}	Полимод.	Полимод.	288
Min	103	192	255
Max	359	809	609
S	75,8	186	124
V	30,9	44,7	33,9
δm	20,2	62,0	41,3
A	-0,1	1,0	1,3
δA	0,6	0,7	0,7
E	-0,8	1,7	0,6
δE	1,2	1,4	1,4

Примечание: n – объем выборки (количество проб), m – среднее арифметическое, X_{геом} – среднее геометрическое; X_{med} – медиана, X_{mod} – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

Температура и количество потребляемого топлива на предприятиях теплоэнергетики имеют между собой высокую корреляционную связь ($r = 0,75$). В 2016 г. в исследуемом районе уровень пылевой нагрузки был статистически достоверно (по тесту Краскелла-Уоллиса) низким из-за небольшого количества осадков и высокой скорости ветра в сравнении с другими годами. В 2022 г. уровень нагрузки значительно превысил показатели других периодов наблюдений, поскольку количество осадков за этот зимний сезон оказалось более высоким.

Установлены статистически значимые высокие уровни пылевой нагрузки в северном и северо-восточном (подветренных) направлениях от изучаемых предприятий по сравнению с нагрузкой в юго-западной (наветренной) стороне (рисунок 4.2.2).

Таблица 4.2.2 – Корреляционная связь в системе «пылевая нагрузка-метеопараметры»

Параметр	2016 г.	2022 г.	2023 г.	Тип корреляционной связи метеопараметра с пылевой нагрузкой*
Температура воздуха, °С	-11,4	-10,9	-13,4	Слабая ($r = -0,2$)
Скорость ветра, м/с	3,9	3,8	3,6	Высокая ($r = -0,69$)
Относительная влажность воздуха (г/м^3)	78,5	79,8	81,8	Высокая ($r = 0,75$)
Сумма осадков, мм	130	155	140	Очень высокая ($r = 0,87$)
Пылевая нагрузка, $\text{мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$	245	381	366	

Примечание: * – вербально-числовая шкалы Харрингтона (Адлер и др., 1976); r – коэффициент корреляции; метео данные с сайта world-weather.ru

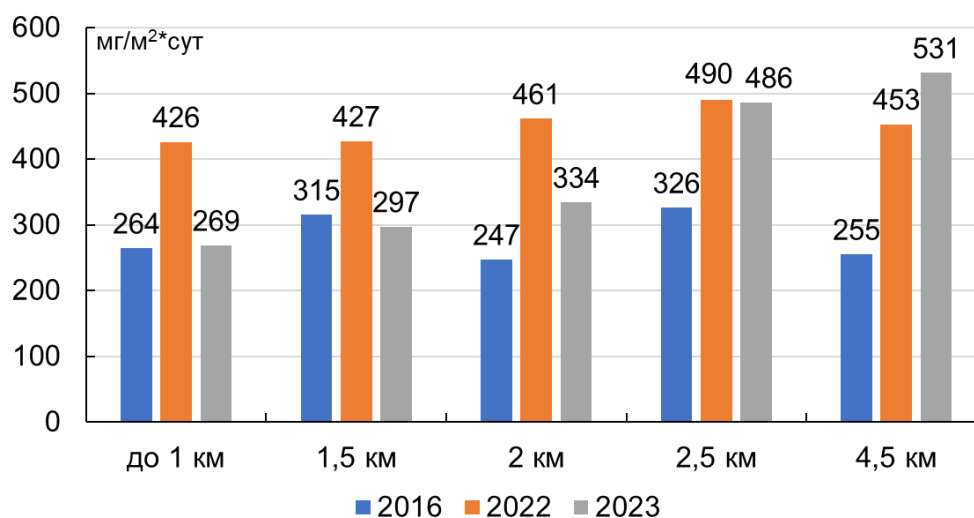


Рисунок 4.2.2 – Диаграмма распределения пылевой нагрузки по мере удаления от предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово

С подветренной стороны на расстоянии до 1 км от предприятий расположена долина реки Томи. Исследования, проведенные учеными (Леженин и др., 2016), продемонстрировали изменения в направлениях и скоростях ветра, которые могут влиять как на накопление, так и на транспортировку загрязняющих веществ в нижних слоях атмосферы на территориях, прилегающих к крупным рекам.

В север-северо-восточном направлении на расстоянии от 1,5 до 2 км наблюдается увеличение уровня пылевой нагрузки (среднее – $346 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$). Это связано с расположением в этом районе исследования низко-этажной застройки,

такой, как частный сектор. Стоит отметить, что на данном расстоянии расположена также лесопарковая зона с древесной растительностью, которая способствует более интенсивному накоплению пыли в снежном покрове под кронами деревьев (Su et al., 2018; Dong et al., 2020; Wei et al., 2020).

На расстоянии 2,5-4,5 км от предприятий в зоне расположения высокоэтажной застройки уровень пылевой нагрузки возрастает в 1,5 раза и в среднем составляет 434 мг/(м².сут.). Высокоэтажная застройка является барьером для переноса пылевых частиц, что способствует наибольшему осаждению на снежный покров в данном районе. В работах (Касимов и др., 2012; Глазунов и др., 2000) показано, что высотная застройка городов формирует особый микроклимат и «городской каньон». Это приводит к турбулентным колебаниям скорости ветра и создает геохимическую неоднородность за счет перераспределения потоков атмосферных загрязняющих веществ и формирования зон седиментации в городских почвах и других средах осаждения (Касимов и др., 2012).

В зоне влияния исследуемых предприятий до 2,5 км не исключается дополнительный вклад локальных источников в формирование уровня пылевой нагрузки, таких как печное отопление в частном секторе. Наши исследования показали, что уровень пылевой нагрузки статистически значимо ниже в 3-7 раз в частном секторе с печным отоплением (среднее 61 мг/(м².сут.)) и жилым районом с высотной застройкой, расположенных в южной и юго-восточной частях города вне зоны влияния от изучаемых предприятий (среднее 146 мг/(м².сут.)). Это может свидетельствовать о незначительном влиянии печного отопления на общую пылевую нагрузку в районах расположения предприятий.

Немаловажный вклад в распределение пылевой нагрузки в районе исследования вносит высота дымовых труб на изучаемых предприятиях. Предприятие теплоэнергетики имеет высоту труб от 180 до 210 м, и перенос загрязняющих веществ в атмосфере может достигать до 5 км (Кузбасский вестник – новостной журнал, 2017). Для предприятия коксохимии характерна небольшая высота труб (до 80 м), что способствует оседанию загрязняющих веществ вблизи источников (Зубицкий, 2000).

Средняя величина пылевой нагрузки вблизи предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово ($331 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) более, чем в 3 раза выше пылевой нагрузки на схожих территориях в г. Москве ($27 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) (Касимов и др., 2012)), Новосибирске ($98 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) (Артамонова, 2020)), Томске ($56 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) (Таловская, 2022)), Тобольске ($17 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) (Московченко и др., 2021), близко к уровню в г. Улан-Удэ ($331 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) (Чудинова и др., 2023).

Таким образом, в г. Кемерово пылевая нагрузка изменяется от 15 до 610, при среднем $207 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$. Территория города разделена на три ореола, различающиеся по интенсивности пылевой нагрузки. Первый ореол, характеризующийся высоким уровнем пылевой нагрузки относительно фона ($240\text{--}600 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$), расположен в северной части города с частной и многоэтажной застройкой, который подвержен влиянию выбросов от предприятий теплоэнергетики и химического производства. Второй ореол, где зафиксирован средний уровень пылевой нагрузки ($60\text{--}240 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$), занимает основную часть городской территории, включая жилые, рекреационные районы и транспортные узлы. Третий ореол с низким уровнем пылевой нагрузки ($20\text{--}60 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) охватывает западную часть города, где расположен завод по производству азотных удобрений, а также южную часть с малоэтажной жилой застройкой.

В период наблюдений в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии с 2016 по 2023 гг. пылевая нагрузка в среднем варьируется от 245 до $380 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$, что соответствует изменению от низкого до среднего уровня загрязнения. На неоднородность распределения пылевой нагрузки по годам влияют метеопараметры. При увеличении относительной влажности воздуха и количества осадков наблюдается рост пылевой нагрузки, при снижении скорости ветра уровень пылевой нагрузки также возрастает. По мере удаления в северо-восточном направлении от предприятий уровень пылевой нагрузки на расстоянии от 1,5 до 4,5 км выше, чем на территории, находящейся до 1 км от них. Рост пылевой нагрузки с увеличением расстояния от предприятий связан как с природными (ветровые потоки вблизи реки, лесопарковая зона), так и антропогенными (высота застройки зданий) факторами.

Глава 5. Эколого-геохимический анализ состояния территории г. Кемерово по данным изучения состава нерастворимой фракции снежного покрова

5.1 Геохимическая характеристика нерастворимой фракции снежного покрова

По результатам исследований в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово установлены уровни накопления макроэлементов (Ca, Na, Fe), тяжелых металлов и металлоидов (Ba, Co, Cr, Zn, As, Hg, Sb, Sr), лантаноидов (La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu), U, Th, Rb, Cs, Ta, Hf, Sc.

Нормальный закон распределения содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова установлен для Na, Co, As, Rb, Sr, Cs, La, Ce, Yb, Hf, Ta, Hg, Th, U, отличный от нормального – Ca, Sc, Fe, Cr, Zn, Br, Sb, Ba, Nd, Sm, Eu, Tb, Lu по результатам теста Колмогорова-Смирнова, Лиллиефорса и расчетов величины отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (таблица 5.1.1). На рисунке 5.1.1 представлены в качестве примера гистограммы распределения некоторых химических элементов в соответствии с нормальным законом распределения и с логнормальным распределением, что характеризует особенности элементного состава нерастворимой фракции снежного покрова. Коэффициент вариации (V) для большинства элементов имеет значение менее 50 %, что соответствует однородному распределению, а неоднородность распределения в выборке характерна для Ca, As, Sb (V от 50 до 70 %).

По коэффициентам концентраций элементов выявлена степень интенсивности их накопления в пробах нерастворимой фракции снежного покрова (таблица 5.1.2). Наиболее интенсивно ($K_c > 10$) концентрируются в пробах такие элементы, как U, Yb, Tb, La, Sm, Ba. Менее интенсивно ($K_c = 2-10$) в нерастворимой фракции снежного покрова накапливаются Ce, Sr, Ca, Ta, Na, Th, Lu, Hf, Nd, Sc. Близко к фоновым концентрациям ($K_c < 1,5$) выделяются элементы Eu, Cr, As, Br в пробах.

Таблица 5.1.1 – Числовые характеристики содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Э-т	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S	V	δm	A	δA	E	δE	A/ δA	E/ δE	Распределение
Na	0,8	0,8	0,9	Полимод.	0,2	1,4	0,2	29,6	0,03	-0,3	0,3	-0,2	0,6	-0,9	-0,4	нормальное
Ca	3,8	3,3	3,6	Полимод.	1,3	11,3	2,2	57,6	0,3	1,1	0,3	1,3	0,6	3,7	2,1	логнормальное
Sc	14,5	14,2	15,0	16	6,8	21,0	2,6	17,9	0,3	-0,7	0,3	0,8	0,6	-2,2	1,4	логнормальное
Cr	66,7	62,6	63,0	Полимод.	10,4	139	22,2	33,3	2,8	1,0	0,3	3,5	0,6	3,3	5,9	логнормальное
Fe	3,4	3,4	3,5	Полимод.	1,8	5,0	0,5	15,4	0,1	-0,2	0,3	1,5	0,6	-0,6	2,5	логнормальное
Co	19,7	19,4	19,9	17,2	12,2	30,9	3,6	18,1	0,4	0,1	0,3	0,8	0,6	0,4	1,3	нормальное
Zn	233	219	220	155	118,3	549	86,9	37,4	11,0	1,4	0,3	2,3	0,6	4,5	3,9	логнормальное
As	6,1	4,0	5,7	0,5	0,1	17,6	4,0	65,5	0,5	0,3	0,3	-0,2	0,6	0,9	-0,4	нормальное
Br	0,7	0,5	0,3	0,3	0,3	3,3	0,8	115	0,1	2,1	0,3	3,2	0,6	6,9	5,5	логнормальное
Rb	80,5	74,8	79,4	109	5,1	136	25,6	31,8	3,2	-0,2	0,3	-0,1	0,6	-0,6	-0,2	нормальное
Sr	644	588	637	580	119,2	1311	260	40,4	32,7	0,5	0,3	0,1	0,6	1,6	0,1	нормальное
Sb	3,4	3,0	3,1	2,3	1,2	11,7	2,0	57,8	0,3	2,0	0,3	5,3	0,6	6,6	8,9	логнормальное
Cs	5,7	5,4	5,6	8,0	2,0	10,0	1,8	31,5	0,2	0,4	0,3	-0,2	0,6	1,3	-0,4	нормальное
Ba	1036	983	1039	1240	462,1	2739	356	34,3	44,8	1,7	0,3	7,2	0,6	5,6	12,1	логнормальное
La	42,2	41,3	44,1	44,7	19,6	61,0	8,5	20,0	1,1	-0,4	0,3	0,2	0,6	-1,4	0,3	нормальное
Ce	82,7	79,0	89,8	91,0	22,5	113	21,1	25,5	2,7	-1,1	0,3	0,9	0,6	-3,7	1,4	логнормальное
Nd	31,1	28,3	31,0	32,3	4,5	79,6	13,1	42,0	1,6	1,1	0,3	2,9	0,6	3,6	4,8	логнормальное
Sm	6,6	5,0	7,0	Полимод.	0,1	11,4	2,6	39,9	0,3	-0,8	0,3	1,1	0,6	-2,6	1,8	логнормальное
Eu	1,5	1,4	1,6	1,6	0,01	3,1	0,5	29,1	0,1	0,1	0,3	3,5	0,6	0,4	5,9	логнормальное
Tb	1,0	0,9	0,9	0,8	0,4	2,3	0,4	36,5	0,04	0,9	0,3	1,8	0,6	3,1	2,9	логнормальное
Yb	3,4	3,4	3,5	Полимод.	1,8	4,6	0,6	16,9	0,1	-0,7	0,3	0,4	0,6	-2,2	0,7	нормальное
Lu	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,7	0,1	17,5	0,01	-0,6	0,3	0,8	0,6	-1,9	1,4	логнормальное
Hf	6,3	6,2	6,4	7,0	3,2	9,6	1,2	18,5	0,1	0,01	0,3	0,4	0,6	0,04	0,7	нормальное
Ta	0,9	0,8	0,9	1,3	0,1	1,7	0,4	42,9	0,05	-0,2	0,3	-0,4	0,6	-0,5	-0,6	нормальное
Hg	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,03	21,0	0,004	0,2	0,3	-0,7	0,6	0,7	-1,2	нормальное
Th	11,6	11,1	11,7	14,7	4,5	18,1	3,0	26,1	0,4	-0,2	0,3	-0,4	0,6	-0,6	-0,7	нормальное
U	4,4	4,1	4,3	4,1	0,7	7,2	1,4	30,9	0,2	-0,1	0,3	-0,02	0,6	-0,4	-0,04	нормальное

Примечание: общее количество проб – 68, m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

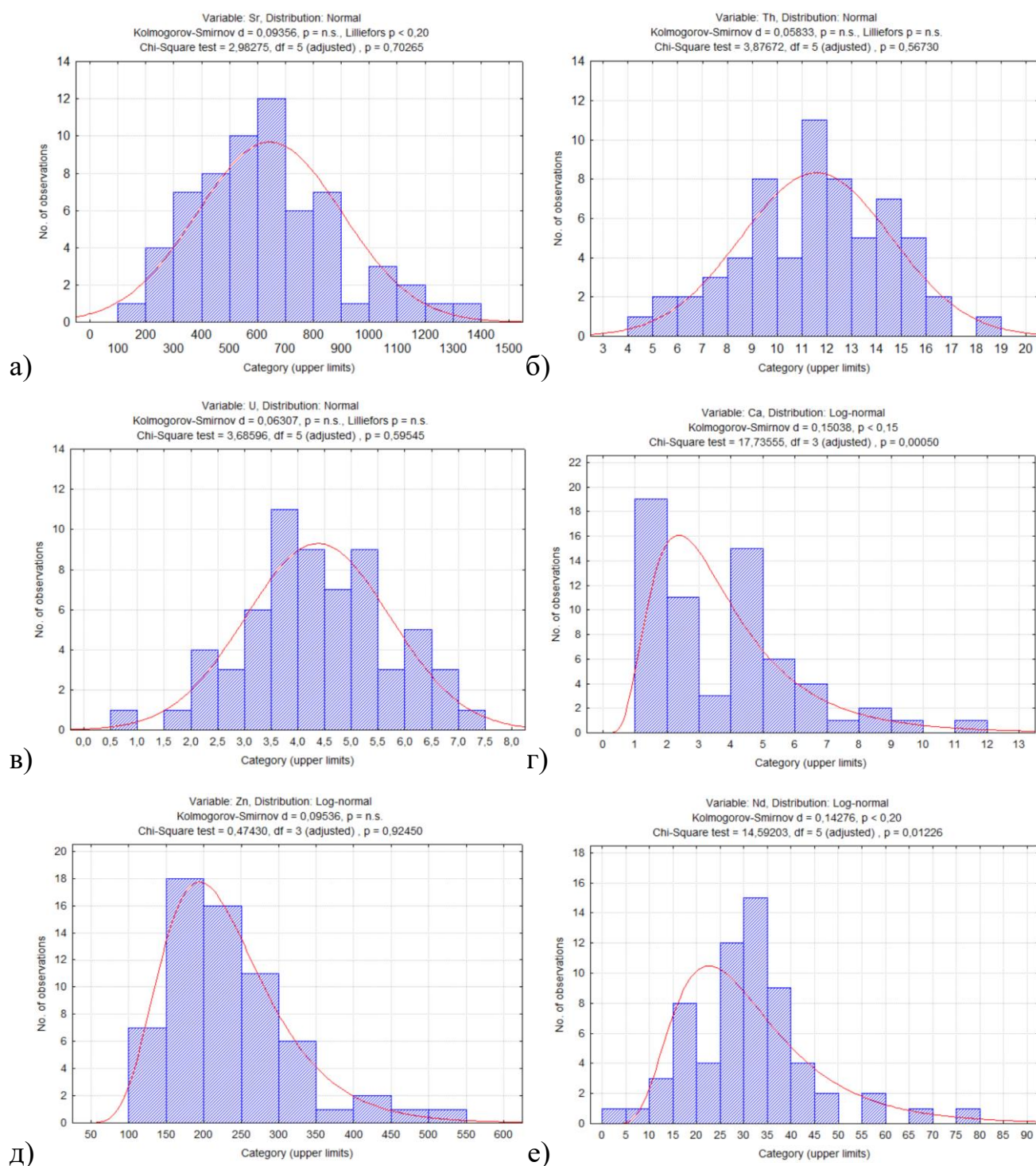


Рисунок 5.1.1 – Гистограммы нормального и логнормального распределения химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово: а) стронций, б) торий, в) уран, г) кальций, д) цинк, е) неодим

Общий вклад химических элементов в загрязнение снежного покрова отражается с помощью суммарного показателя загрязнения согласно общепринятой градации (таблица 2.3.1), для исследуемой территории г. Кемерово

установлен средний уровень загрязнения рассматриваемым спектром элементов (таблица 5.1.2).

Таблица 5.1.2 – Геохимический ряд ассоциаций химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и суммарный показатель загрязнения (Z_c) снежного покрова на территории г. Кемерово

Геохимический ряд элементов	Z_c
$U_{22} - Yb_{17} - Tb_{16} - La_{15} - Sm_{11} - Ba_{10} - Ce_8 - Sr_6 - Ca_5 - Ta_4 - Na_4 - Th_4 - Lu_3 - Hf_3 - Nd_2 - Sc_2 - Hg_2 - Co_2 - Fe_2 - Zn_2 - Cs_2 - Sb_2 - Rb_2 - Eu_1 - Cr_1 - As_1 - Br_1$	124

Примечание: субскрипты – значения K_c ; Hg – метод ААСМ; выделены **полужирным шрифтом** элементы с наиболее интенсивным накоплением; *курсивом с менее интенсивным накоплением*; обычным шрифтом элементы близкие к фоновым концентрациям.

Распределение уровня суммарного показателя загрязнения на территории представлено на рисунке 5.1.2. Высокий уровень загрязнения зафиксирован в основном в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии, а также в частном секторе южной части города.

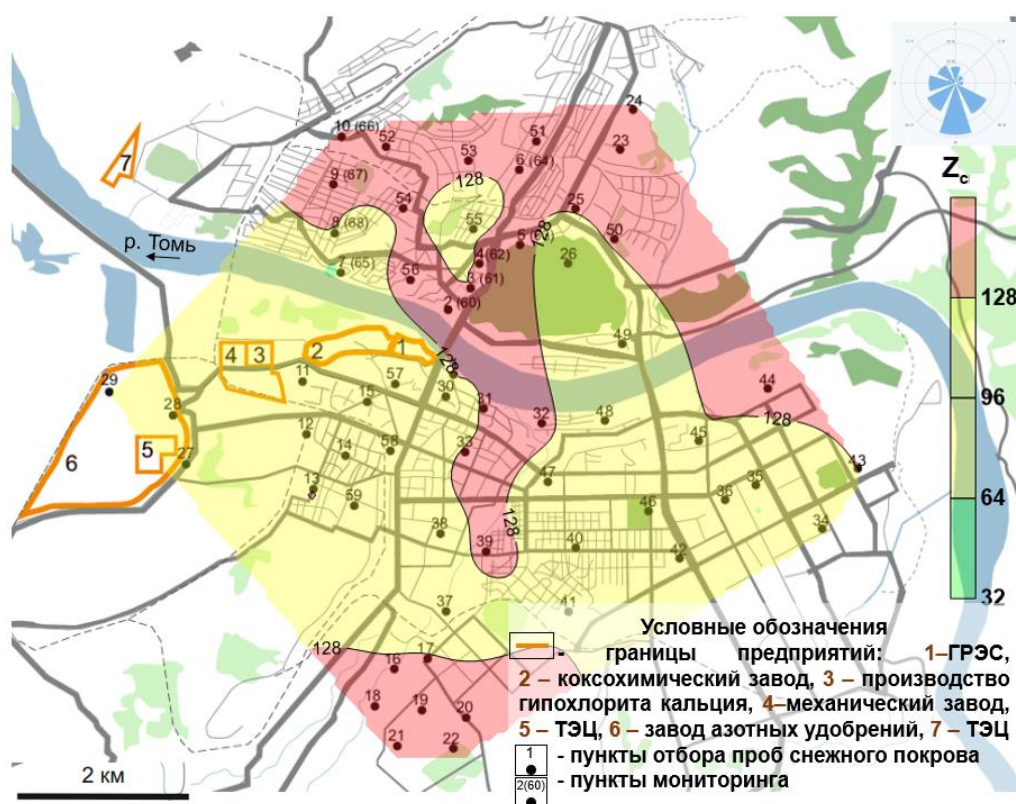


Рисунок 5.1.2 – Карта-схема распределения суммарного показателя загрязнения снежного покрова на территории г. Кемерово («роза» ветров на зимний период)

Определены корреляционные связи между химическими элементами в нерастворимой фракции снежного покрова (таблица 5.1.3). Выявлены наиболее значимые коэффициенты корреляции на уровне $p < 0,01$. Высокая и очень высокая корреляционная связь (r от 0,63 до 0,92) установлена между элементами Sc, Co, Rb, Cs, Ba, La, Ce, Eu, Yb, Lu, Hf, Th, U, что может указывать на общий источник их поступления и схожих геохимических свойствах.

В результате проведения кластерного анализа установлены ассоциации между химическими элементами по наивысшим мерам сходства парных коэффициентов корреляции Пирсона r . Дендрограммы корреляционных матриц содержаний химических элементов в пробах г. Кемерово представлены на рисунке 5.1.3. Сила корреляционной связи между элементами для каждого кластера представлена в таблице 5.1.4. На дендрограмме первой представлена парная корреляция [Ba-Sr], между которыми выражена средняя связь. Следующим представлена ассоциация химических элементов [Ta-Th-Cs-Rb] с высоким типом связи и третий кластер состоит из ассоциации [Nd-Ce] со средней связью. Четвертый кластер представлен обширной ассоциацией [U-Eu-Co-Hf-La-Yb-Lu-Sc] с высокой и очень высокой связью. Оставшиеся кластеры состоят из парных связей элементов [Sb-Zn] с очень высокой, [Br-Cr] со слабой, [Hg-As] и [Fe-Na] со средней связью.

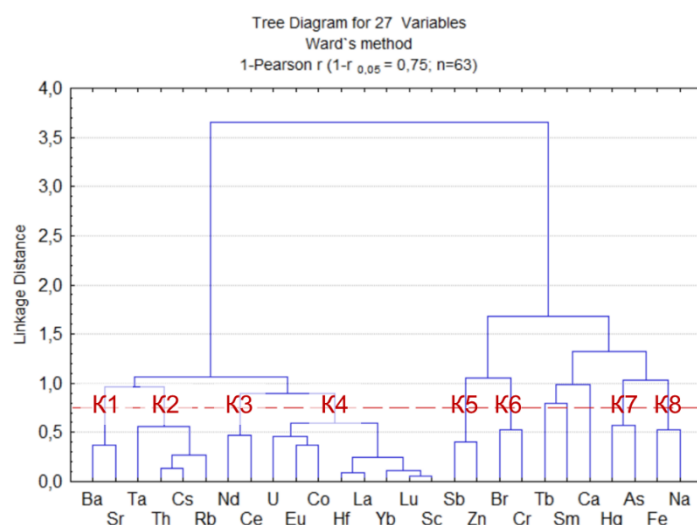


Рисунок 5.1.3 – Дендрограмма корреляционной матрицы геохимического спектра элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Таблица 5.1.3 – Матрица коэффициентов парной корреляции содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

	Na	Ca	Sc	Cr	Fe	Co	Zn	As	Br	Rb	Sr	Sb	Cs	Ba	La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	Hf	Ta	Hg	Th	U
Na	1,00																										
Ca	0,01	1,00																									
Sc	-0,03	0,10	1,00																								
Cr	0,15	0,05	0,17	1,00																							
Fe	0,45	0,10	0,61	0,33	1,00																						
Co	-0,11	0,06	0,62	0,50	0,46	1,00																					
Zn	0,11	0,22	-0,27	0,60	-0,07	0,28	1,00																				
As	0,24	-0,05	0,12	0,33	0,23	0,25	0,27	1,00																			
Br	-0,21	0,13	-0,14	0,31	0,03	0,17	0,21	0,19	1,00																		
Rb	0,28	-0,32	0,64	0,07	0,46	0,31	-0,38	0,09	-0,16	1,00																	
Sr	0,07	-0,08	0,48	0,28	0,52	0,67	-0,01	0,20	0,26	0,48	1,00																
Sb	0,16	0,21	-0,19	0,54	-0,05	0,22	0,81	0,22	0,003	-0,36	-0,19	1,00															
Cs	0,27	-0,57	0,54	0,19	0,46	0,34	-0,26	0,06	-0,23	0,80	0,46	-0,21	1,00														
Ba	0,08	-0,40	0,51	0,37	0,43	0,65	0,10	0,16	-0,14	0,57	0,61	0,02	0,73	1,00													
La	0,11	-0,33	0,75	0,29	0,49	0,70	-0,05	0,17	-0,18	0,68	0,60	-0,06	0,78	0,82	1,00												
Ce	0,07	0,06	0,75	0,19	0,48	0,47	-0,25	0,15	-0,09	0,46	0,40	-0,17	0,37	0,43	0,63	1,00											
Nd	-0,12	-0,15	0,60	-0,03	0,30	0,41	-0,25	-0,03	-0,19	0,40	0,37	-0,23	0,38	0,42	0,58	0,60	1,00										
Sm	0,13	-0,03	0,43	0,23	0,40	0,30	0,03	-0,01	-0,27	0,28	0,15	0,10	0,33	0,32	0,39	0,22	0,24	1,00									
Eu	0,04	-0,12	0,67	0,25	0,51	0,67	-0,13	0,21	0,07	0,48	0,55	-0,13	0,48	0,55	0,72	0,58	0,43	0,37	1,00								
Tb	0,001	0,22	0,53	0,10	0,33	0,41	-0,04	0,23	-0,06	0,30	0,19	-0,01	0,15	0,20	0,33	0,30	0,26	0,36	0,37	1,00							
Yb	0,10	-0,18	0,82	0,12	0,53	0,51	-0,14	0,20	-0,38	0,62	0,35	-0,03	0,61	0,62	0,80	0,62	0,60	0,55	0,59	0,41	1,00						
Lu	0,12	-0,09	0,89	0,23	0,61	0,61	-0,13	0,23	-0,25	0,65	0,46	-0,06	0,67	0,65	0,84	0,68	0,56	0,43	0,71	0,45	0,87	1,00					
Hf	0,17	-0,35	0,74	0,39	0,62	0,69	-0,04	0,25	-0,05	0,69	0,60	-0,05	0,77	0,82	0,92	0,65	0,51	0,47	0,77	0,35	0,79	0,84	1,00				
Ta	0,02	-0,44	0,42	0,27	0,26	0,27	0,003	0,11	-0,15	0,52	0,23	0,09	0,60	0,55	0,57	0,35	0,37	0,38	0,40	0,15	0,57	0,55	0,63	1,00			
Hg	0,13	0,13	0,20	0,26	0,29	0,45	0,28	0,45	0,40	0,13	0,34	0,22	0,05	0,22	0,19	0,11	0,04	-0,07	0,30	0,19	0,19	0,20	0,24	-0,10	1,00		
Th	0,19	-0,49	0,63	0,36	0,48	0,48	-0,13	0,13	-0,24	0,76	0,49	-0,10	0,87	0,83	0,86	0,50	0,47	0,48	0,63	0,25	0,74	0,75	0,87	0,68	0,02	1,00	
U	0,09	-0,32	0,45	0,31	0,35	0,59	0,06	0,14	-0,13	0,46	0,40	0,08	0,61	0,72	0,75	0,41	0,41	0,34	0,63	0,25	0,53	0,57	0,76	0,44	0,18	0,71	1,0

Примечание: n = 68; критическое значение коэффициента корреляции 0,25 при доверительной вероятности 0,01; **полужирный шрифт** – значимые корреляционные связи.

Таблица 5.1.4 – Значение коэффициента корреляции (r) в кластерах, выделенных в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Номер кластера на дендрограмме*	Ассоциация элементов	r
1	Ba-Sr	0,61
2	Ta-Th-Cs-Rb	0,46 - 0,87
3	Nd-Ce	0,6
4	U-Eu-Co-Hf-La-Yb-Lu-Sc	0,67 - 0,92
5	Sb-Zn	0,81
6	Br-Cr	0,31
7	Hg-As	0,45
8	Fe-Na	0,45

Примечание: * – дендрограмма на рисунке 5.1.2.

Для установления пространственного распределения химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово и определения источников формирования атмогеохимических зон был применен факторный анализ по методу главных компонент. На основе критерия Каттелла («каменистой осыпи»), в соответствии с которым отбираются главные компоненты с собственным значением дисперсии больше единицы, было выделено три ключевых фактора (рисунок 5.1.4). В таблице 5.1.5 приведены факторные нагрузки элементов, превышающие 0,5 ед. Элементы Cs и Th демонстрируют высокие коэффициенты корреляции сразу с двумя факторами, что может указывать на смешанный характер их происхождения. Как показал анализ, фактор 1 является ведущим и обуславливает 40 % дисперсии содержаний химических элементов (Sc, Fe, Co, Rb, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Th, U, Ta) в нерастворимой фракции снежного покрова. Фактор 2, на который приходится 11 % дисперсии, объединяет Cr, Zn, Br, Sb. Фактор 3, отвечающий за 8 % дисперсии, включает Ca, Cs, Ta, Th, Hg.

Для выявления устойчивых пространственных особенностей формирования геохимических ассоциаций в пробах нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово применялся метод кластеризации (К-средних) (рисунок 5.1.5; таблица 5.1.6). С помощью данного метода были разделены все точки отбора проб на кластеры со схожими ассоциациями изучаемого спектра элементов в пробах для идентификации территориального расположения зон со специфичным

спектром химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова (атмогеохимические зоны), формирующихся под влиянием источников загрязнения в городе.

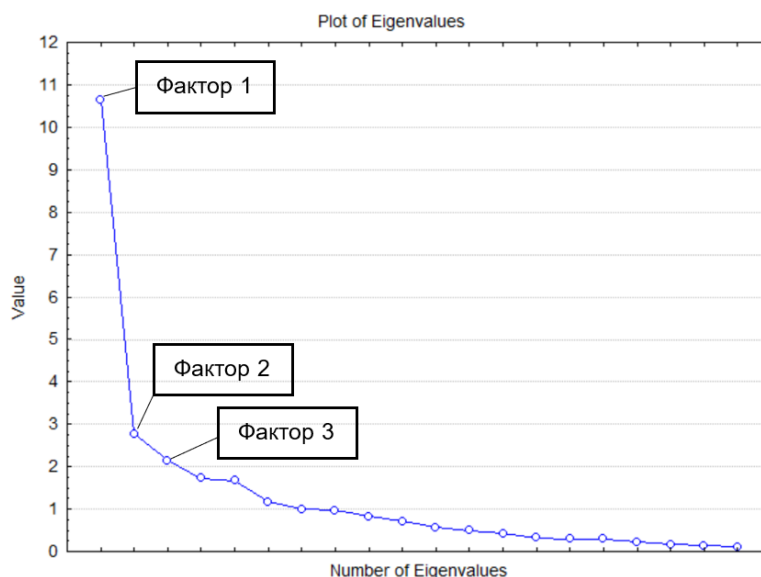


Рисунок 5.1.4 – График собственных значений факторов химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Результаты кластерного анализа точек отбора проб по совокупности факторов (рисунок 5.1.5) с учетом результатов сравнений кластерных средних для каждого фактора позволили выполнить градацию уровней кластера по стандартизированным значениям: аномально высокие ($> +1,5$) соответствовали уровню «Лидер», значения в интервале $(0; +1,5)$ – «Выше среднего», $(-1,5; 0)$ – «Ниже среднего», а аномально низкие ($< -1,5$) – «Аутсайдер» (таблица 5.1.6).

Обработка геохимических данных с помощью факторного, корреляционного, К-средних, кластерного методов анализа, сравнения выборок по содержанию элементов в пробах (тесты Краскела-Уоллиса и Колмогорова-Смирнова) позволила выделить четыре техногенные атмогеохимические зоны на территории города, различающихся по уровням накопления и ассоциациям изучаемых химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова, и пространственному расположению (рисунок 5.1.6). Числовые характеристики содержания элементов в пробах из каждой зоны представлены в таблицах 5.1.7-5.1.10.

Таблица 5.1.5 – Факторные нагрузки химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Элемент	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
Na	0,12	-0,03	0,06
Ca	-0,11	-0,06	-0,75
Sc	0,96	-0,07	-0,11
Cr	0,18	0,73	0,15
Fe	0,71	0,08	-0,09
Co	0,76	0,50	-0,17
Zn	-0,10	0,75	0,03
As	0,24	0,38	-0,18
Br	-0,21	0,62	-0,01
Rb	0,69	-0,20	0,37
Sr	0,53	0,37	0,04
Sb	-0,19	0,55	-0,07
Cs	0,68	-0,12	0,57
Ba	0,54	0,41	0,41
La	0,92	0,06	0,23
Ce	0,65	-0,03	0,03
Nd	0,58	-0,15	-0,001
Sm	0,33	0,02	0,21
Eu	0,71	0,01	-0,05
Tb	0,53	-0,09	-0,38
Yb	0,90	-0,12	0,07
Lu	0,94	-0,03	0,02
Hf	0,91	0,19	0,26
Ta	0,50	0,14	0,54
Hg	0,31	0,38	-0,50
Th	0,79	0,06	0,56
U	0,64	0,25	0,35
Вес фактора, %	40	11	8

Примечание: полужирный шрифт – значения факторных нагрузок более 0,5.

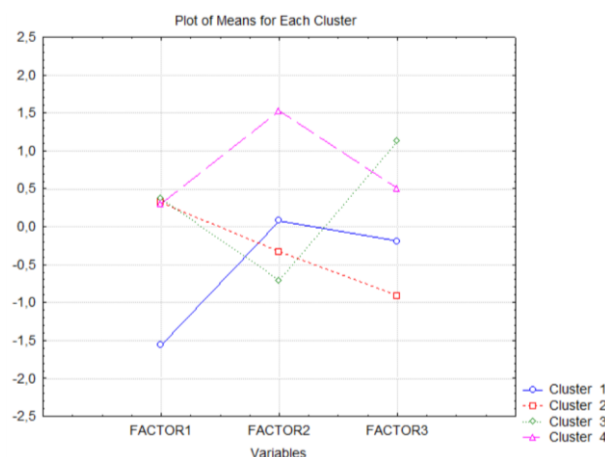


Рисунок 5.1.5 – Графики факторных средних для каждого кластера точек отбора

Таблица 5.1.6 – Результаты наблюдений по совокупности факторов в порядковой шкале стандартизированных измерений концентраций элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Кластер точек отбора проб (номера точек на карте-схеме*)		Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3
		Ассоциации элементов		
		Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Ta-Th-U	Cr-Co-Zn-Br-Sb	Ca-Cs-Ta-Hg-Th
1	15, 26, 27, 30, 34-37, 42, 46, 57, 65, 68	Аутсайдер	Выше среднего	Ниже среднего
2	25, 38-41, 43-45, 47, 48, 50, 52-56, 58-64, 66	Выше среднего	Ниже среднего	Ниже среднего
3	1-14, 18, 51	Выше среднего	Ниже среднего	Выше среднего
4	16, 17, 19-24, 28, 29, 31-33, 49, 67	Выше среднего	Лидер	Ниже среднего

Примечание: * – рисунок 5.1.6

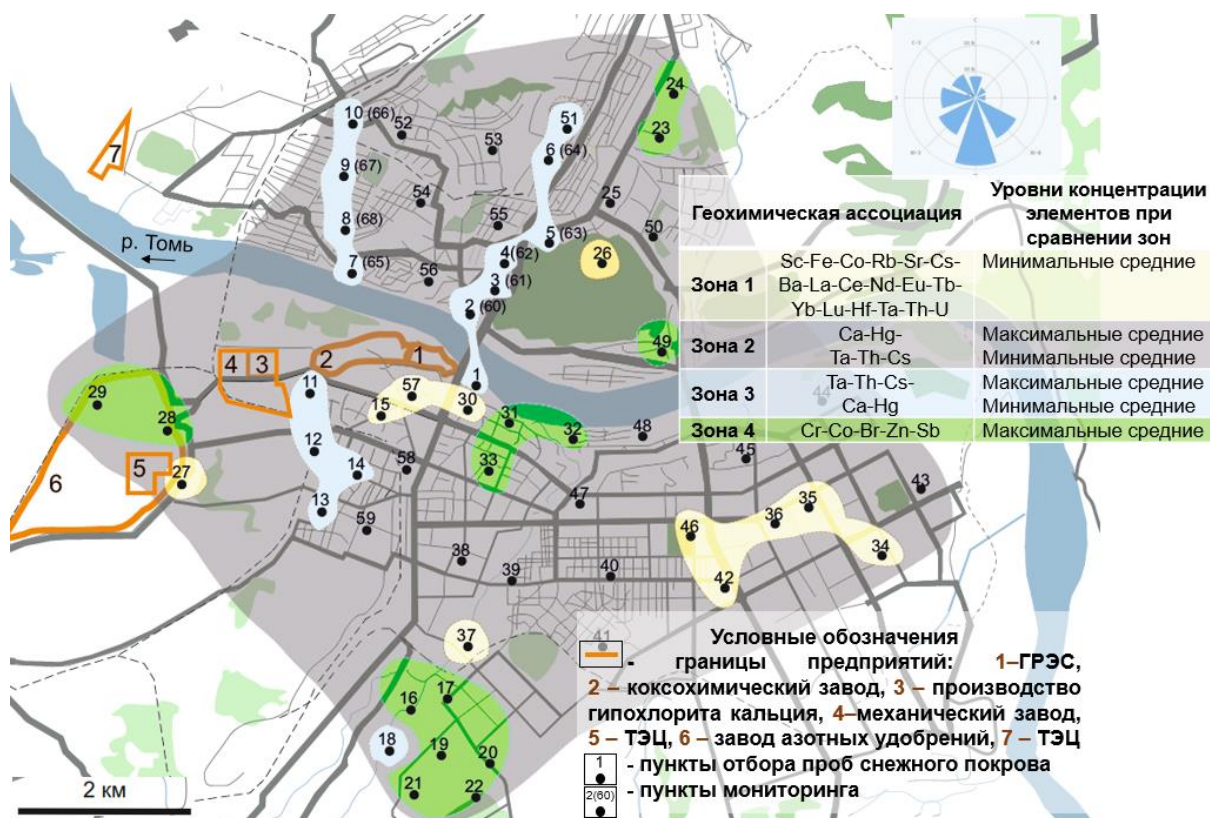


Рисунок 5.1.6 – Карта-схема зонирования территории г. Кемерово по особенностям накопления химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова

Таблица 5.1.7 – Числовые характеристики содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне 1

Э-т	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S	V	δm	A	δA	E	δE	A/ δA	E/ δE	Распределение
Sm	5,7	5,4	5,4	4,4	2,6	11,4	2,1	37,5	0,6	1,6	0,6	3,9	1,2	2,5	3,3	логнормальное
Ce	60,3	57,9	58,8	56,9	22,5	82,5	15,6	25,8	4,3	-0,8	0,6	2,0	1,2	-1,4	1,7	логнормальное
Ca	1,9	0,7	0,3	0,2	0,1	7,3	2,7	140	0,8	1,2	0,6	-0,3	1,2	1,9	-0,3	нормальное
Lu	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,06	18,2	0,02	-0,1	0,6	-0,7	1,2	-0,2	-0,6	нормальное
U	2,8	2,6	2,9	2,3	0,7	4,4	1,0	35,7	0,3	-0,3	0,6	0,3	1,2	-0,4	0,2	нормальное
Th	7,1	6,9	7,1	5,9	4,5	9,5	1,6	22,0	0,4	0,1	0,6	-1,1	1,2	0,1	-0,9	нормальное
Cr	61,9	56,0	63,2	87,6	12,6	87,6	23,5	38,0	6,5	-0,6	0,6	-0,2	1,2	-0,9	-0,2	нормальное
Yb	2,5	2,6	2,4	1,9	1,8	3,3	0,5	20,0	0,1	0,3	0,6	-1,1	1,2	0,5	-0,9	нормальное
Hf	4,6	4,6	4,6	4,6	3,2	5,5	0,6	12,8	0,2	-0,8	0,6	1,5	1,2	-1,3	1,2	нормальное
Ba	629	618	582	582	462	830	124	19,7	34,4	0,5	0,6	-0,9	1,2	0,9	-0,8	нормальное
Sr	395	381	374	374	213	646	111	28,2	30,8	0,9	0,6	1,4	1,2	1,5	1,1	нормальное
Nd	18,1	16,1	18,5	18,5	4,5	34,6	8,4	46,3	2,3	0,6	0,6	0,9	1,2	0,9	0,7	нормальное
As	5,6	5,1	5,6	5,6	0,9	10,1	2,0	35,8	0,6	-0,2	0,6	3,7	1,2	-0,2	3,1	логнормальное
Br	1,4	0,9	1,3	0,3	0,3	3,1	1,2	85,5	0,3	0,5	0,6	-1,4	1,2	0,9	-1,2	нормальное
Cs	3,5	3,4	3,5	2,8	2,0	4,9	0,8	23,1	0,2	-0,04	0,6	-0,5	1,2	-0,1	-0,4	нормальное
Tb	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	1,3	0,3	39,8	0,1	1,8	0,6	4,1	1,2	2,9	3,4	логнормальное
Sc	10,1	9,9	9,7	8,1	6,8	13,1	1,9	19,6	0,6	-0,1	0,6	-1,3	1,2	-0,2	-1,1	нормальное
Rb	48,8	48,0	46,4	39,7	39,4	65,3	9,6	19,7	2,7	0,6	0,6	-0,9	1,2	1,0	-0,8	нормальное
Fe	1,2	0,6	0,3	0,3	0,2	3,5	1,4	120	0,4	1,0	0,6	-1,1	1,2	1,6	-0,9	нормальное
Zn	249	242	274	274	143	336	57,7	23,2	16,0	-0,7	0,6	0,005	1,2	-1,2	0,004	нормальное
Ta	0,6	0,5	0,5	0,5	0,1	1,1	0,3	48,0	0,1	0,6	0,6	0,3	1,2	0,9	0,2	нормальное
Co	15,4	15,3	16,2	12,8	12,2	19,6	2,4	15,5	0,7	0,01	0,6	-1,3	1,2	0,01	-1,1	нормальное
Na	0,4	0,2	0,1	0,1	0,04	1,36	0,5	140	0,2	1,3	0,6	-0,2	1,2	2,1	-0,1	нормальное
Eu	1,2	1,1	1,1	0,9	0,71	2,18	0,4	33,6	0,1	1,4	0,6	2,8	1,2	2,3	2,3	логнормальное
La	28,2	27,8	29,5	23,5	19,6	34,4	4,8	17,0	1,3	-0,3	0,6	-1,2	1,2	-0,5	-1,0	нормальное
Sb	4,1	3,5	3,9	3,9	1,29	9,80	2,2	55,3	0,6	1,2	0,6	2,8	1,2	1,9	2,4	логнормальное
Hg	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,04	26,1	0,02	-0,4	0,8	-2,0	1,6	-0,6	-1,3	нормальное

Примечание: общее количество проб – 13, m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

Таблица 5.1.8 – Числовые характеристики содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне 2

Э-т	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S	V	δm	A	δA	E	δE	A/ δA	E/ δE	Распределение
Sm	6,2	3,4	7,2	Полимод.	0,01	11,3	3,4	54,3	0,7	-0,6	0,5	-0,3	0,9	-1,3	-0,3	нормальное
Ce	85,7	80,5	91,3	Полимод.	25,7	113	24,6	28,7	5,0	-1,5	0,5	1,2	0,9	-3,2	1,4	логнормальное
Ca	4,3	2,6	4,6	Полимод.	0,3	11,3	3,2	73,5	0,7	0,3	0,5	-0,6	0,9	0,6	-0,6	нормальное
Lu	0,5	0,5	0,5	Полимод.	0,4	0,6	0,1	8,9	0,01	0,4	0,5	1,4	0,9	0,8	1,5	нормальное
U	4,2	4,0	4,3	Полимод.	1,8	6,1	1,1	26,4	0,2	-0,3	0,5	-0,3	0,9	-0,7	-0,3	нормальное
Th	10,8	10,7	11,0	Полимод.	6,4	14,3	1,7	16,1	0,4	-0,4	0,5	0,6	0,9	-0,9	0,6	нормальное
Cr	62,7	58,9	61,3	Полимод.	10,4	139	20,0	31,9	4,1	1,8	0,5	11,1	0,9	3,7	12,1	логнормальное
Yb	3,6	3,6	3,6	Полимод.	3,1	4,1	0,3	7,9	0,1	-0,04	0,5	-0,5	0,9	-0,1	-0,6	нормальное
Hf	6,2	6,2	6,4	Полимод.	4,9	8,0	0,7	11,0	0,1	0,3	0,5	1,1	0,9	0,6	1,2	нормальное
Ba	969	953	989	Полимод.	632	1311	180	18,6	36,8	-0,04	0,5	-0,8	0,9	-0,1	-0,9	нормальное
Sr	672	594	646	Полимод.	119	1209	301	44,8	61,5	0,2	0,5	-0,6	0,9	0,4	-0,6	нормальное
Nd	35,5	32,3	30,1	Полимод.	13,4	79,6	16,4	46,2	3,3	1,2	0,5	1,2	0,9	2,5	1,3	логнормальное
As	5,5	3,6	5,5	0,5	0,1	17,6	3,9	71,8	0,8	1,1	0,5	2,5	0,9	2,3	2,8	логнормальное
Br	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	1,3	0,3	61,3	0,05	2,5	0,5	5,8	0,9	5,3	6,3	логнормальное
Cs	5,1	4,9	5,2	Полимод.	2,8	7,0	1,1	21,0	0,2	-0,2	0,5	-0,2	0,9	-0,5	-0,2	нормальное
Tb	1,2	1,2	1,2	Полимод.	0,6	2,3	0,4	30,0	0,07	0,9	0,5	2,1	0,9	1,8	2,3	логнормальное
Sc	15,7	15,6	15,7	Полимод.	13,0	18,1	1,2	7,9	0,3	-0,1	0,5	-0,4	0,9	-0,2	-0,4	нормальное
Rb	77,4	70,2	73,7	Полимод.	5,1	114	23,2	30,0	4,7	-0,9	0,5	2,9	0,9	-2,1	3,2	логнормальное
Fe	2,5	1,8	3,1	Полимод.	0,4	4,1	1,4	57,2	0,3	-0,8	0,5	-1,2	0,9	-1,7	-1,3	нормальное
Zn	209	203	208	Полимод.	118	331	51,1	24,5	10,4	0,4	0,5	-0,1	0,9	0,9	-0,1	нормальное
Ta	0,7	0,6	0,8	Полимод.	0,1	1,3	0,3	45,2	0,07	-0,3	0,5	-0,2	0,9	-0,7	-0,2	нормальное
Co	20,6	20,5	20,3	Полимод.	16,1	23,2	2,0	9,7	0,4	-0,5	0,5	-0,5	0,9	-1,1	-0,5	нормальное
Na	0,53	0,4	0,6	Полимод.	0,1	1,2	0,4	68,2	0,1	0,1	0,5	-1,2	0,9	0,2	-1,3	нормальное
Eu	1,59	1,6	1,6	Полимод.	0,9	2,6	0,4	21,9	0,1	0,8	0,5	1,5	0,9	1,7	1,7	логнормальное
La	43,1	42,9	43,6	Полимод.	34,8	49,3	4,2	9,6	0,9	-0,7	0,5	-0,3	0,9	-1,5	-0,4	нормальное
Sb	3,00	2,8	2,8	Полимод.	1,2	5,6	1,2	38,2	0,2	0,6	0,5	-0,2	0,9	1,3	-0,2	нормальное
Hg	0,16	0,2	0,2	Полимод.	0,1	0,2	0,04	23,6	0,01	0,1	0,5	-1,4	0,9	0,2	-1,5	нормальное

Примечание: общее количество проб – 24, m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

Таблица 5.1.9 – Числовые характеристики содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне 3

Э-т	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S	V	δm	A	δA	E	δE	A/ δA	E/ δE	Распределение
Sm	7,4	7,3	7,5	8,0	5,5	10,2	1,3	16,9	0,3	0,4	0,6	0,3	1,1	0,7	0,3	нормальное
Ce	89,3	88,6	91,7	91,0	69,5	113	11,6	12,9	2,9	-0,2	0,6	0,1	1,1	-0,4	0,1	нормальное
Ca	0,6	0,3	0,2	0,2	0,1	4,2	1,1	196	0,3	3,1	0,6	9,4	1,1	5,4	8,6	логнормальное
Lu	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,7	0,1	14,4	0,02	-0,2	0,6	-0,04	1,1	-0,3	-0,04	нормальное
U	4,9	4,8	4,6	4,1	3,8	6,9	1,0	20,9	0,3	0,6	0,6	-0,8	1,1	1,1	-0,7	нормальное
Th	14,3	14,1	14,7	14,7	11,1	18,1	2,1	14,7	0,5	-0,1	0,6	-0,8	1,1	-0,2	-0,7	нормальное
Cr	60,4	59,5	58,3	57,5	40,2	78,1	10,6	17,5	2,6	-0,1	0,6	-0,4	1,1	-0,1	-0,3	нормальное
Yb	3,8	3,8	3,9	Полимод.	2,9	4,4	0,5	12,3	0,1	-0,7	0,6	-0,6	1,1	-1,3	-0,5	нормальное
Hf	6,8	6,8	7,1	7,0	5,3	8,4	0,9	13,8	0,2	-0,4	0,6	-0,7	1,1	-0,7	-0,7	нормальное
Ba	1155	1136	1158	1240	755	1641	220	19,0	54,9	0,4	0,6	0,7	1,1	0,7	0,6	нормальное
Sr	636	626	638	580	389	879	115	18,2	28,9	0,03	0,6	1,2	1,1	0,1	1,1	нормальное
Nd	33,5	32,7	33,0	32,3	18,0	49,4	7,2	21,6	1,8	0,1	0,6	1,3	1,1	0,1	1,2	нормальное
As	5,6	3,2	3,7	0,9	0,5	14,0	4,9	87,5	1,2	0,4	0,6	-1,6	1,1	0,7	-1,5	нормальное
Br	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,1	26,4	0,03	0,3	0,6	-2,2	1,1	0,5	-2,0	нормальное
Cs	7,8	7,6	7,9	8,0	5,7	10,0	1,4	18,0	0,4	-0,2	0,6	-1,0	1,1	-0,3	-0,9	нормальное
Tb	0,9	0,8	0,9	0,8	0,5	1,2	0,2	19,2	0,04	-0,4	0,6	1,8	1,1	-0,7	1,7	нормальное
Sc	15,1	15,0	15,6	15,6	11,8	18,5	2,2	14,2	0,5	-0,6	0,6	-0,7	1,1	-1,0	-0,6	нормальное
Rb	106	104	109	109	76,7	136	16,6	15,7	4,2	-0,5	0,6	-0,3	1,1	-0,8	-0,3	нормальное
Fe	0,8	0,5	0,4	0,4	0,3	3,9	1,1	144	0,3	2,6	0,6	5,4	1,1	4,5	4,9	логнормальное
Zn	175	170	157	156	122	320	49,2	28,1	12,3	1,9	0,6	4,3	1,1	3,3	3,9	логнормальное
Ta	1,1	1,1	1,1	1,3	0,8	1,5	0,2	20,0	0,06	0,1	0,6	-0,4	1,1	0,2	-0,4	нормальное
Co	18,2	17,9	18,3	17,2	12,2	23,0	3,3	17,9	0,8	-0,2	0,6	-0,8	1,1	-0,4	-0,7	нормальное
Na	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,9	0,2	130	0,06	2,9	0,6	8,5	1,1	5,2	7,8	логнормальное
Eu	1,6	1,6	1,7	1,6	1,1	1,8	0,2	13,1	0,05	-1,2	0,6	0,1	1,1	-2,1	0,1	нормальное
La	46,3	45,9	47,4	44,7	35,9	57,5	6,5	14,1	1,6	-0,1	0,6	-0,6	1,1	-0,2	-0,6	нормальное
Sb	2,3	2,2	2,1	2,4	1,5	3,7	0,7	30,2	0,2	0,7	0,6	-0,6	1,1	1,3	-0,5	нормальное
Hg	0,1	0,1	0,1	Полимод.	0,1	0,2	0,03	22,3	0,01	0,3	0,6	-0,5	1,1	0,6	-0,4	нормальное

Примечание: общее количество проб – 16, m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

Таблица 5.1.10 – Числовые характеристики содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне 4

Э-т	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S	V	δm	A	δA	E	δE	A/ δA	E/ δE	Распределение
Sm	6,9	5,3	6,7	6,3	0,1	11,0	2,4	34,4	0,6	-1,4	0,6	5,0	1,1	-2,4	4,5	логнормальное
Ce	83,7	82,4	87,7	66,8	66,8	110	15,2	18,1	3,9	0,2	0,6	-1,3	1,1	0,4	-1,2	нормальное
Ca	1,3	0,8	0,4	0,3	0,3	5,6	1,4	110	0,4	2,3	0,6	6,7	1,1	4,0	6,0	логнормальное
Lu	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,7	0,1	14,2	0,02	0,9	0,6	1,6	1,1	1,6	1,4	логнормальное
U	5,1	4,9	5,0	3,9	3,7	7,2	1,3	24,6	0,3	0,3	0,6	-1,5	1,1	0,5	-1,4	нормальное
Th	12,9	12,7	13,2	12,4	9,1	16,8	2,0	15,8	0,5	-0,3	0,6	0,6	1,1	-0,6	0,5	нормальное
Cr	149	119	89,6	380	70,9	380	121	81,2	31,2	1,6	0,6	0,7	1,1	2,7	0,7	логнормальное
Yb	3,3	3,3	3,4	2,7	2,7	4,6	0,6	16,7	0,1	0,6	0,6	0,04	1,1	1,1	0,03	логнормальное
Hf	6,9	6,8	6,9	6,1	5,7	9,6	1,1	15,4	0,3	1,3	0,6	2,1	1,1	2,2	1,8	логнормальное
Ba	1509	1374	1334	2739	647	2739	693	45,9	179	0,9	0,6	0,1	1,1	1,7	0,1	нормальное
Sr	865	817	855	1311	477	1311	298	34,4	76,9	0,3	0,6	-1,0	1,1	0,5	-0,9	нормальное
Nd	29,9	29,3	30,8	22,9	22,9	41,4	6,0	20,1	1,6	0,5	0,6	-0,9	1,1	0,8	-0,8	нормальное
As	8,2	6,3	8,7	8,5	0,5	11,8	3,4	41,3	0,9	-1,7	0,6	2,4	1,1	-2,9	2,2	логнормальное
Br	1,6	1,1	1,7	0,3	0,3	3,3	1,2	74,5	0,3	-0,02	0,6	-1,8	1,1	-0,03	-1,6	нормальное
Cs	5,7	5,6	5,9	5,1	3,9	7,3	1,1	18,7	0,3	-0,4	0,6	-0,7	1,1	-0,7	-0,6	нормальное
Tb	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	1,5	0,3	27,3	0,1	1,2	0,6	1,2	1,1	2,1	1,1	логнормальное
Sc	14,4	14,3	14,1	13,1	11,7	21,0	2,3	15,8	0,6	1,8	0,6	4,3	1,1	3,0	3,8	логнормальное
Rb	77,1	75,7	68,6	63,7	63,0	105	15,9	20,7	4,1	0,6	0,6	-1,3	1,1	1,1	-1,2	нормальное
Fe	1,7	1,0	0,4	0,4	0,4	3,7	1,5	87,0	0,4	0,2	0,6	-2,2	1,1	0,3	-1,9	нормальное
Zn	340	330	314	314	223	549	90,8	26,7	23,4	0,9	0,6	0,5	1,1	1,6	0,5	нормальное
Ta	1,1	1,0	1,1	0,9	0,4	1,7	0,4	33,5	0,1	-0,2	0,6	-0,2	1,1	-0,4	-0,2	нормальное
Co	22,9	22,8	22,3	21,7	18,5	30,9	2,9	12,9	0,8	1,6	0,6	3,2	1,1	2,7	2,8	логнормальное
Na	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,98	0,4	92,7	0,1	0,2	0,6	-2,2	1,1	0,4	-1,9	нормальное
Eu	1,5	0,6	1,6	0,01	0,01	3,1	0,9	59,4	0,2	-0,4	0,6	0,4	1,1	-0,8	0,4	нормальное
La	45,0	44,3	47,2	37,3	32,7	61,0	8,4	18,7	2,2	0,2	0,6	-0,5	1,1	0,3	-0,4	нормальное
Sb	5,3	4,8	4,2	3,7	2,0	11,7	2,6	49,7	0,7	1,3	0,6	1,2	1,1	2,3	1,1	логнормальное
Hg	0,2	0,2	0,2	Полимод.	0,1	0,2	0,04	22,4	0,02	0,1	1,0	-3,4	2,6	0,1	-1,3	нормальное

Примечание: общее количество проб – 15, m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

В первой зоне сформирована большая полиэлементная геохимическая ассоциация (Sc–Fe–Co–Rb–Sr–Cs–Ba–La–Ce–Nd–Eu–Tb–Yb–Lu–Hf–Ta–Th–U) в нерастворимой фракции снежного покрова. Химические элементы ассоциации образуют средние, высокие и очень высокие корреляционные связи (r от 0,3 и до 0,8), и коррелируют с доминирующим «фактором 1».

Пробы из первой зоны статистически значимо ($p \leq 0,0001$) отличаются пониженными концентрациями выделенного спектра элементов от данных для проб других сформированных зон. Отмечается, что концентрации Co, Sc, Nd, Eu, Cs, Rb, Fe в нерастворимой фракции находятся на уровне фона; Hf, Lu, Th, Ta, Sr, Ce, Ba – 2-10 фонов; La, Tb, Yb, U – 10-15 фонов и соответствует среднему уровню загрязнения (таблица 5.1.11). Расположение зоны относится к юго-восточной части города, где находится разно-уровневая жилая застройка, рекреационным районам и наветренной стороне от предприятий.

Во второй и третьей геохимической зоне выделена ассоциация Ca–Cs–Ta–Th–Hg, которая коррелирует с «фактором 3». Отличительной особенностью фактора является проявление концентраций элементов между этими двумя зонами. Для проб нерастворимой фракции снежного покрова, находящихся во второй зоне, характерны максимальные средние концентрации Ca и Hg, минимальные средние концентрации Ta, Th, Cs, превышающие фон от 1,5 до 6 раз (таблица 5.1.8; 5.1.11). Суммарный показатель загрязнения соответствует среднему уровню (таблица 5.1.11). Третья зона отмечается с обратной тенденцией в накоплении рассматриваемого спектра элементов в пробах, превышающих фон от 2 до 5 раз (таблица 5.1.9; 5.1.11). Уровень загрязнения снежного покрова в третьей зоне оценивается как высокий (таблица 5.1.11). Дополнительно в третьей зоне проявляются повышенные концентрации Ce, Lu, Hf, Nd, Sm, La, Yb, Rb, Eu ($K_c = 2-20$) в пробах относительно фона и в сравнении с данными для остальных выделенных зон ($p = 0,002$). Вторая зона проявляется на большей части территории города, вероятно, указывая на процессы дальнего массопереноса вещества от источников выбросов. Третья зона располагается в северном, северо-восточном и

юго-западном направлениях от предприятий теплоэнергетической и химической промышленности (коксохимический завод, производство гипохлорита кальция).

Для четвертой геохимической зоны характерна ассоциация Cr–Co–Zn–Br–Sb, статистически значимо коррелирующая с «фактором 2», под названием «автотранспорт». В ассоциации определена сильная корреляционная связь между элементами (r от 0,6 и до 0,9). Отличительной чертой четвертой зоны от других сформированных зон является статистически значимо высокие концентрации элементов выделенной ассоциации ($p \leq 0,0001$), а также U, Ba, Sr, Co и Hg в пробах (таблица 5.1.10). В нерастворимой фракции уровни накопления Zn, Sb и Hg на уровне 2-2,5 фонов (таблица 5.1.11). Данная зона характеризуется высоким уровнем загрязнения снежного покрова (таблица 5.1.11). Локализация зоны соответствует расположению основных автомобильных развязок, центрального парка и в южной части города с частной жилой застройкой.

Таблица 5.1.11 – Геохимический ряд ассоциации элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и суммарный показатель загрязнения в выделенных зонах на территории г. Кемерово

Номер зоны	Коэффициент концентрации			Z _c , уровень загрязнения*
	менее 2	2-10	более 10	
1	Zn _{1,8} – Sb _{1,8} – Fe _{1,5} – Co _{1,5} – Sc _{1,4} – Nd _{1,2} – Hg _{1,1} – Eu _{1,1} – Cs ₁ – Rb _{0,9} – Cr _{0,6} – As _{0,3}	Sm _{9,5} – Ba _{6,3} – Ce _{5,9} – Ca _{4,5} – Sr _{3,9} – Na _{3,9} – Ta _{2,9} – Th _{2,5} – Lu _{2,3} – Hf _{2,1}	U _{14,1} – Yb _{12,5} – Tb _{10,7} – La _{10,1}	81, средний
2	Hg _{1,9} – Fe _{1,9} – Zn _{1,5} – Eu _{1,4} – Cs _{1,4} – Rb _{1,4} – Sb _{1,3} – Cr _{0,6} – As _{0,3}	Ba _{9,7} – Ce _{8,3} – Sr _{6,7} – Ca _{6,6} – Na _{3,8} – Th _{3,7} – Ta _{3,6} – Lu _{3,4} – Hf _{2,8} – Nd _{2,4} – Sc _{2,2} – Co ₂	U _{20,8} – Tb _{20,3} – Yb _{17,8} – La _{15,4} – Sm _{10,4}	126, средний
3	Fe _{1,9} – Rb _{1,9} – Co _{1,8} – Hg _{1,7} – Eu _{1,5} – Zn _{1,3} – Sb ₁ – Cr _{0,5} – As _{0,3}	Ce _{8,7} – Sr _{6,4} – Ta _{5,5} – Na _{4,9} – Th _{4,9} – Lu _{3,5} – Hf _{3,1} – Ca _{2,4} – Nd _{2,2} – Cs _{2,2} – Sc _{2,1}	U _{24,4} – Yb ₁₉ – La _{16,5} – Tb _{14,2} – Sm _{12,4} – Ba _{11,6}	132, высокий
4	Fe _{1,8} – Cs _{1,6} – Rb _{1,4} – Cr _{1,4} – Eu _{1,3} – Hg _{0,6} – As _{0,4}	Sr _{8,7} – Ce _{8,1} – Ta _{5,5} – Th _{4,4} – Na _{4,1} – Ca _{3,5} – Lu _{3,3} – Hf _{3,1} – Zn _{2,4} – Sb _{2,3} – Co _{2,2} – Sc ₂ – Nd ₂	U _{25,7} – Yb _{16,7} – La _{16,1} – Tb _{15,5} – Ba _{15,1} – Sm _{11,5}	136, высокий

Примечание: субскрипты – значения K_c; * – градация по Сагуну Ю.Е. с соавторами (Геохимия ..., 1990).

Выявленная редкометалльная геохимическая специфика нерастворимой фракции снежного покрова вероятно обусловлена сжиганием и использованием угля на предприятиях. В углях Кузнецкого бассейна приоритетными элементами-примесями являются группа редкоземельных, радиоактивных элементов и некоторых токсичных металлов (Арбузов С.И. с соавторами, 2000; 2005; 2007; 2012; 2015; 2019). Металлы могут сорбироваться на мелких частицах золы уноса и поступать в окружающую среду (Юдович и Кетрис, 2005, 2009; Sushil and Batra, 2006; Czech et al., 2019), и затем оседать в снежный покров.

Выявлено, что в г. Кемерово ореолы группы редкоземельных элементов с уровнями накопления 5-6 фонов в нерастворимой фракции снежного покрова формируются в зоне переноса выбросов предприятий теплоэнергетики и коксохимии, что указывает на источники поступления данных элементов от сжигания и использования угля (рисунок 5.1.7). Кроме того, проводилось сравнение между концентрациями химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова вблизи предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии, углей из разрезов Кузнецкого бассейна, используемых в виде топлива на ГРЭС, и золе уноса этой теплоэлектростанции (рисунок 5.1.8). Анализ показал влияние состава угля и золы уноса на формирование редкоземельной геохимической спецификации нерастворимой фракции снежного покрова. Результаты зависимости химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова, угле и золе уноса ГРЭС будут детально рассмотрены в разделе 4.2.

Угольные теплоэлектростанции и коксохимическая промышленность являются источниками эмиссии ртути и мышьяка в окружающую среду (Янин, 1992, 2004; Волох, 1998; Юдович и Кетрис, 2005; Guo et al., 2020) и ПАУ (Gune et al., 2019; Liu et al., 2024). В зимний период концентрации химических элементов (Zn, As, Hg) в атмосферных аэрозолях и снежном покрове, полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) в воздухе возрастают за счет сжигания топлива, инверсий температур и снижения рассеивающей способности атмосферы (Yang et al., 2020; Маринайте и др., 2020; Московченко, 2021; Gogoi et al., 2021; Темиржанова, 2025). Наши исследования в г. Кемерово показали наличие в

снежном покрове положительной корреляционной зависимости между содержаниями мышьяка и ртути, мышьяком и летучими органическими соединениями, ртутью и фенолами, что может свидетельствовать поступлении данных микроэлементов от общих техногенных источников (таблица 5.1.12). Сведения о содержании ПАУ в снежном покрове представлены в разделе 4.3.



Рисунок 5.1.7 – Карта-схема распределения уровня накопления суммы редкоземельных элементов в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

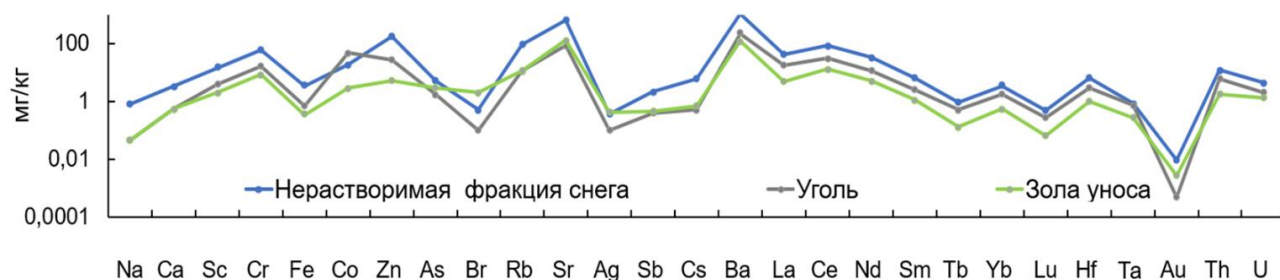


Рисунок 5.1.8 – Концентрации химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова, угле и золе уноса (данные по углю предоставлены С.И. Арбузовым, профессор ОГ ИШПР ТПУ)

Пространственное распределение уровней накопления ртути в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово представлено на рисунке 5.1.9. В зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии находится ореол с превышением фона по ртути в 2,5 раза.

Таблица 5.1.12 – Значения коэффициентов корреляции (r) для ртути и мышьяка с органическими компонентами в снежном покрове

Корреляционная пара	r
Hg-As	0,5
Hg-фенолы	0,6
As-нефтепродукты	-0,96
As-фенолы	-0,93
As-ЛОС	0,89

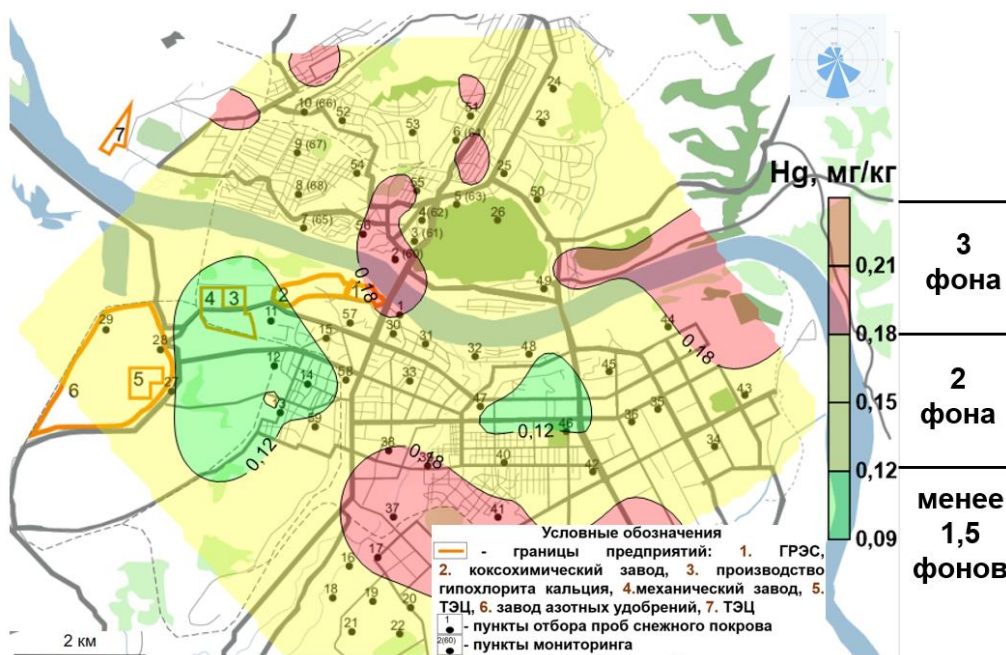


Рисунок 5.1.9 – Карта-схема распределения уровня накопления ртути в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Повышенное содержание Са и Na в нерастворимой фракции снежного покрова на территории города, вероятно, связано с использованием противогололедных реагентов таких как техническая соль (хлорид натрия или кальция), песок, мелкий щебень с добавлением антикоррозийных веществ (Систер, Корецкий, 2004; новостной сайт г. Кемерово (VSE42.RU), 2025). Еще одним

возможным источником кальция может быть производство гипохлорита кальция, функционирующего на территории города. Геохимические ореолы кальция, в которых его концентрации выше фона от 4 до 7 раз, расположены в северном-северо-восточном направлениях от промышленных предприятий и в районах с разноуровневой застройкой и развитой автодорожной сетью (рисунок 5.1.10).

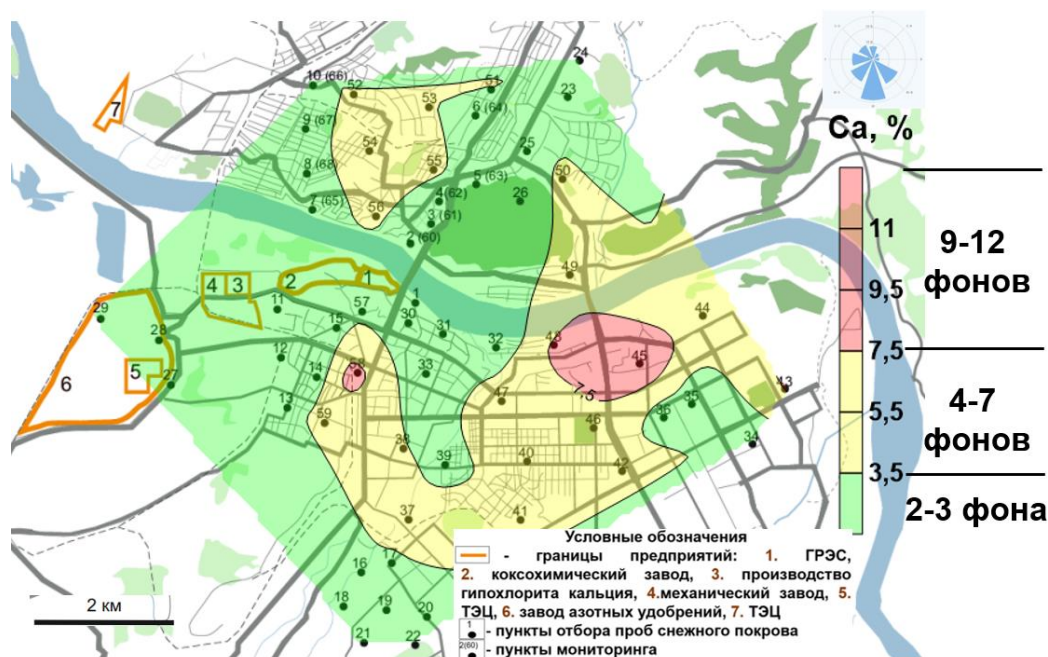


Рисунок 5.1.10 – Карта-схема распределения уровня накопления кальция в нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово

Поступление в окружающую среду города Zn, Sb, Cr, Co связано с выхлопными газами автомобилей, износом шин и тормозных колодок (Von Uexküll et al., 2005; Касимов и др., 2016; Nazarpour et al., 2019; Klöckner et al., 2019; Пожитков, 2024). Автомобильные выбросы также являлись источником Br (Block and Dams, 1978; Begak et al., 2001). В мелких частицах дорожной пыли дворовых территорий наблюдается повышенное содержание тяжелых металлов и металлоидов (Cr, As, Zn и др.) за счет влияния автотранспорта (Сычева, 2025). Следует отметить, что в других компонентах природной среды, например, в лишайниках различных функциональных зон г. Кемерово выявлена ассоциация элементов (Al, Ba, Cr, Fe, Co, S, V, Cu, Cd), связанная с влиянием выбросов тепловых электростанций и производства азотных удобрений, выхлопами автомобилей (Kotov et al., 2021; Zinicovscaia et al., 2024).

5.2 Динамика химического состава нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства (2016- 2023 гг.)

Числовые характеристики содержания химических элементов в период с 2016 по 2023 гг. в пробах нерастворимой фракции снежного покрова в зоне воздействия предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства в г. Кемерово представлены в таблицах 5.2.1 и 5.2.2. Коэффициент вариации менее 50 % для большинства химических элементов (Na, Sc, Cr, Fe, Co, Zn, Rb, Sr, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U), что свидетельствует об однородном распределении, тогда как у элементов Ca, As, Br наблюдается неоднородное распределение. Нормальный закон распределения содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова установлен для Na, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sr, Sb, Cs, Ba, Ce, Sm, Eu, Tb, Hf, Ta, Hg, Th, U, а отличный от нормального – Ca, Sc, Cr, Br, La, Nd, Yb, Lu по результатам расчетов величины отношений асимметрии и эксцесса к их стандартным ошибкам (таблица 5.2.2).

Таблица 5.2.1 – Содержание химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства в г. Кемерово в 2016, 2022 и 2023 гг.

Элемент	2016 г.	2022 г.	2023 г.	Фон*
Na	0,9	0,6	0,8	0,2
Ca	1,7	5,4	4,0	0,82
Sc	14,4	16,1	14,1	7,1
Cr	57,4	59,5	60,1	110
Fe	3,5	3,4	3,5	1,9
Co	17,2	19,8	20,9	10,3
Zn	162	177	209	139
As	5,6	4,1	6,0	18,6
Br	0,4	0,4	0,8	2,9
Rb	101	77,1	87,2	55
Sr	596	520	906	100
Sb	2,1	2,5	2,0	2,3
Cs	7,6	4,7	5,4	3,5
Ba	1110	959	1056	100
La	44,8	42,8	41,6	2,8
Ce	84,9	95,8	81,3	10,3
Nd	30,5	45,1	30,4	14,9
Sm	7,0	7,0	5,5	0,6

Продолжение таблицы 5.2.1

Элемент	2016 г.	2022 г.	2023 г.	Фон*
Eu	1,5	1,5	1,8	1,1
Tb	0,9	1,0	1,0	0,06
Yb	3,6	3,7	3,1	0,2
Lu	0,5	0,5	0,5	0,2
Hf	6,6	6,2	6,2	2,2
Ta	1,0	0,9	0,5	0,2
Hg	0,1	0,1	0,2	0,08
Th	13,8	10,9	10,5	2,9
U	4,8	3,9	4,3	0,2

Примечание: * – фон по данным А.Ю. Шатилова (2001), Е.Г. Язикова (2006), Е.А. Филимоненко (2015), А.В. Таловской (2022)

В нерастворимой фракции снежного покрова из зоны влияния Кемеровской ГРЭС и коксохимического производства из 27 изучаемых элементов уровни концентраций 17 элементов (Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U) статистически достоверно не различаются на протяжении 2016, 2022 и 2023 гг. ($p \geq 0,1$ по тесту Краскела-Уоллиса) (рисунок 5.2.1).

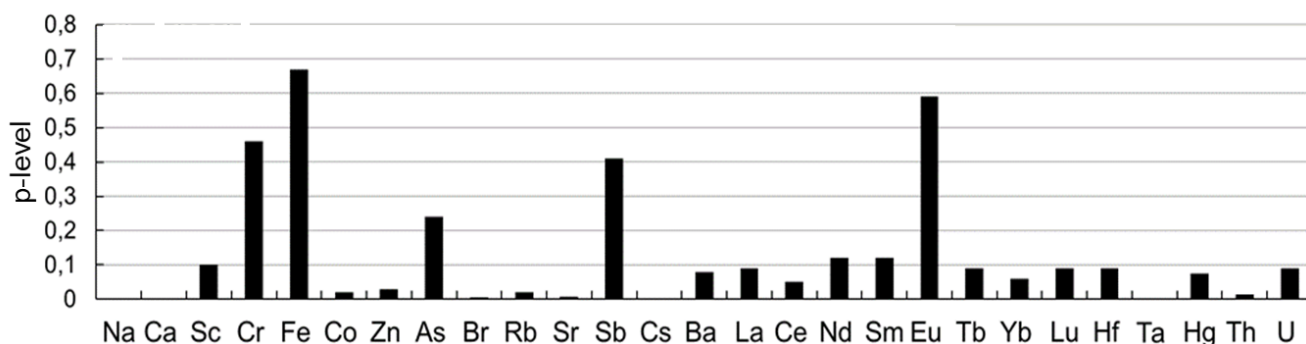


Рисунок 5.2.1 – Уровень значимости различия выборок (p-level) по содержанию химических элементов в пробах (с 2016 по 2023 гг., тест Краскела-Уоллиса)

В динамике геохимической специфики состава нерастворимой фракции снежного покрова концентрации данного спектра элементов остаются повышенными относительно фона, кларка земной коры и кларка ноосферы от 2 до 25 раз (рисунки 5.2.2-5.2.3; таблица 5.2.3).

Таблица 5.2.2 – Числовые характеристики содержания элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства в г. Кемерово (усреднение за 2016-2023 гг.)

Э-т	m	Xгеом	Xmed	Xmod	Min	Max	S	V	δm	A	δA	E	δE	A/ δA	E/ δE	Распределение
Na	0,8	0,8	0,9	1,0	0,1	1,1	0,2	30,7	0,04	-0,8	0,4	0,3	0,8	-1,9	0,3	нормальное
Ca	3,4	2,9	3,3	1,7	1,3	9,4	1,9	55,7	0,3	1,1	0,4	1,6	0,8	2,7	2,0	логнормальное
Sc	14,8	14,5	15,6	15,6	6,8	18,5	2,6	17,6	0,5	-1,3	0,4	1,8	0,8	-3,2	2,2	логнормальное
Cr	58,7	55,5	58,3	57,5	10,4	139	19,2	32,7	3,4	1,9	0,4	10,3	0,8	4,5	12,7	логнормальное
Fe	3,5	3,4	3,5	3,8	1,8	5,0	0,6	18,1	0,1	-0,4	0,4	1,4	0,8	-1,1	1,7	нормальное
Co	18,9	18,6	19,7	17,2	12,2	23,2	3,4	17,8	0,6	-0,6	0,4	-0,7	0,8	-1,4	-0,9	нормальное
Zn	180	175	166	156	118	270	39,8	22,2	7,0	0,5	0,4	-0,7	0,8	1,3	-0,8	нормальное
As	5,3	3,7	5,4	0,9	0,5	14,0	3,7	70,5	0,7	0,6	0,4	-0,4	0,8	1,3	-0,5	нормальное
Br	0,5	0,4	0,3	0,3	0,3	2,3	0,4	80,7	0,1	3,0	0,4	10,1	0,8	7,3	12,5	логнормальное
Rb	90,3	87,5	90,6	109	46,4	136	21,9	24,2	3,9	-0,1	0,4	-0,8	0,8	-0,2	-1,0	нормальное
Sr	662	596	642	580	119	1209	278	42,0	49,1	0,2	0,4	-0,4	0,8	0,5	-0,5	нормальное
Sb	2,2	2,1	2,0	2,3	1,2	4,0	0,7	31,4	0,1	0,9	0,4	0,1	0,8	2,1	0,2	нормальное
Cs	6,2	5,8	5,8	8,0	2,0	10,0	1,9	30,8	0,3	0,1	0,4	-0,3	0,8	0,1	-0,4	нормальное
Ba	1052	1028	1071	1240	551	1642	224	21,3	39,7	0,1	0,4	0,4	0,8	0,1	0,5	нормальное
La	43,4	42,6	44,7	44,7	19,6	56,5	7,3	16,9	1,3	-1,3	0,4	2,5	0,8	-3,1	3,0	логнормальное
Ce	86,9	84,9	91,8	91,0	47,6	113	17,7	20,3	3,1	-0,8	0,4	-0,2	0,8	-1,8	-0,3	нормальное
Nd	34,6	31,1	32,7	32,3	4,5	79,6	15,3	44,2	2,7	1,0	0,4	1,8	0,8	2,4	2,2	логнормальное
Sm	6,6	5,5	7,0	8,0	0,1	11,3	2,6	38,9	0,5	-0,5	0,4	1,0	0,8	-1,2	1,3	нормальное
Eu	1,6	1,6	1,7	1,6	0,7	2,6	0,4	23,5	0,1	0,1	0,4	1,0	0,8	0,2	1,3	нормальное
Tb	0,9	0,9	0,9	0,8	0,4	1,6	0,3	31,5	0,1	0,1	0,4	-0,3	0,8	0,2	-0,4	нормальное
Yb	3,5	3,4	3,6	Полимод.	1,8	4,4	0,6	16,7	0,1	-1,0	0,4	1,0	0,8	-2,3	1,3	логнормальное
Lu	0,5	0,5	0,5	0,5	0,2	0,7	0,1	17,9	0,02	-0,9	0,4	1,7	0,8	-2,1	2,2	логнормальное
Hf	6,4	6,3	6,6	7,0	3,2	8,4	1,1	17,5	0,2	-0,8	0,4	0,8	0,8	-1,8	1,0	нормальное
Ta	0,8	0,7	0,9	1,3	0,1	1,4	0,4	44,1	0,1	-0,8	0,4	-0,3	0,8	-1,9	-0,4	нормальное
Hg	0,2	0,1	0,1	Полимод.	0,1	0,2	0,04	25,0	0,01	0,4	0,4	-1,1	0,8	0,9	-1,4	нормальное
Th	12,1	11,7	11,8	14,7	5,4	18,1	2,9	23,9	0,5	-0,3	0,4	-0,1	0,8	-0,6	-0,1	нормальное
U	4,4	4,2	4,3	4,1	2,0	7,0	1,2	26,2	0,2	0,1	0,4	-0,1	0,8	0,2	-0,1	нормальное

Примечание: общее количество проб – 32, m – среднее арифметическое, Xгеом – среднее геометрическое; Xmed – медиана, Xmod – мода, Min – минимум, Max – максимум, S – стандартное отклонение, δm – стандартная ошибка среднего, V – коэффициент вариации, A – асимметрия, δA – стандартная ошибка асимметрии, E – эксцесс, δE – стандартная ошибка эксцесса; полимод. – полимодальное распределение.

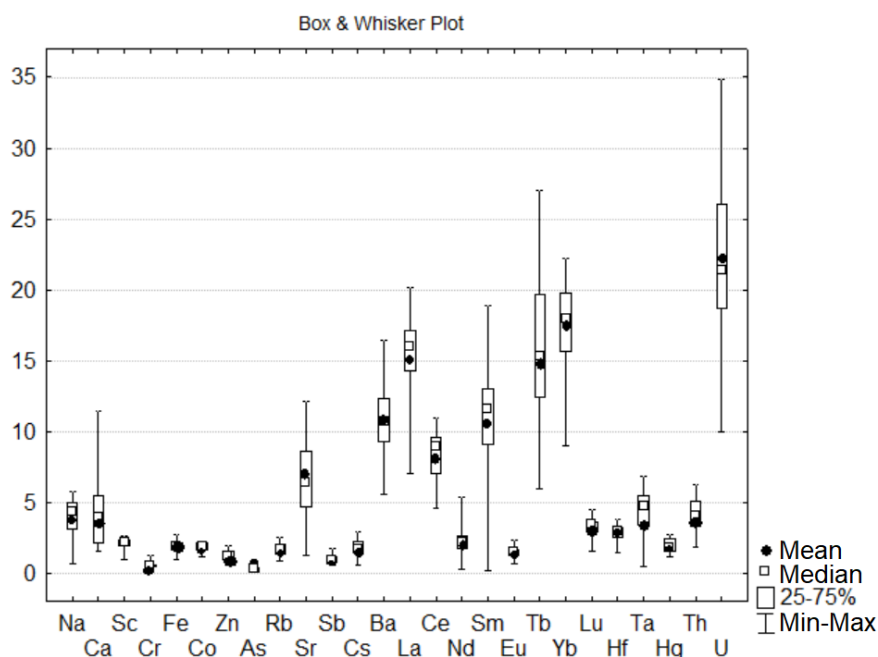


Рисунок 5.2.2 – Диаграмма размаха коэффициентов концентраций химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово (2016-2023 гг.)

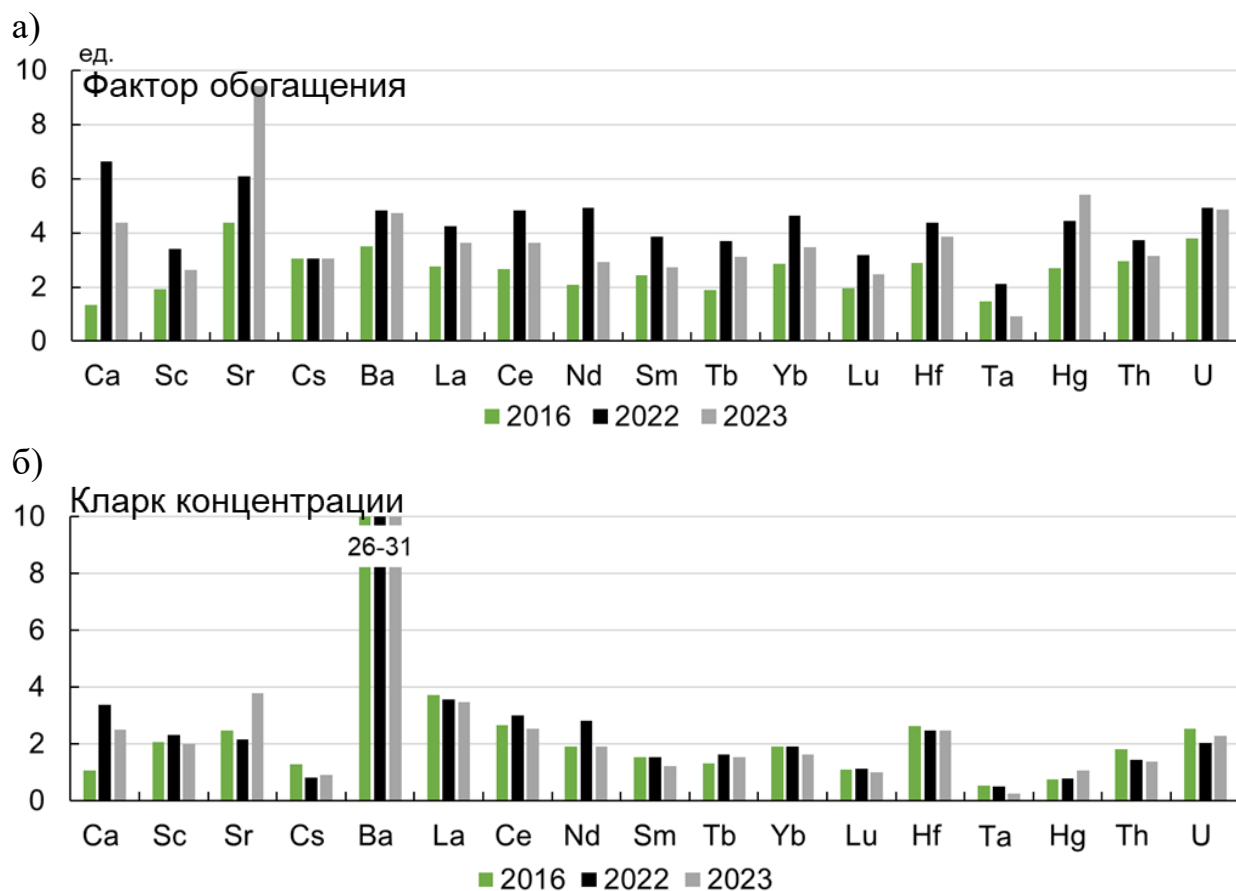


Рисунок 5.2.3 – Динамика концентраций химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова относительно кларка земной коры (а) и ноосферы (б) в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово

Близко к фоновым концентрациям ($K_c < 1,5$) в нерастворимой фракции снежного покрова выделяются Cr, Fe, Co, Zn, As, Rb, Sb, Cs, Eu (таблица 5.2.3). Менее интенсивно ($K_c = 2-10$) накапливаются в пробах Ca, Sc, Sr, Cs, Ce, Nd, Hf, Ta, Hg, Th. Наиболее интенсивно относительно фона ($K_c > 10$) концентрируются в пробах Ba, La, Sm, Tb, Yb, U. Выделенный геохимический спектр формирует высокий уровень загрязнения в 2016 г. и 2022 г.; средний уровень – в 2023 году. По значениям фактора обогащения (ФО= 1,5-9 ед.) данная группа элементов характеризуется антропогенным происхождением.

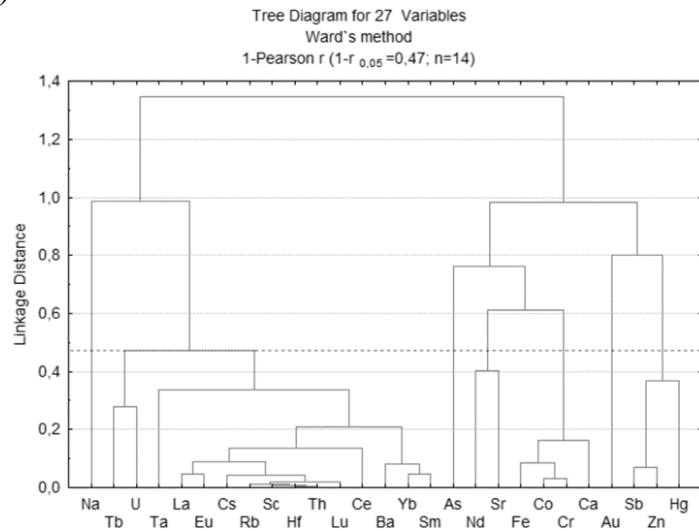
Таблица 5.2.3 – Геохимические ряды элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и суммарный показатель загрязнения (Z_c) в зоне воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии в период с 2016 г. по 2023 г.

Год	Геохимические ряды по коэффициентам концентраций (K_c)	Z_c , уровень загрязнения*
2016	$\text{U}_{24} \text{--} \text{Yb}_{18} \text{--} \text{La}_{16} \text{--} \text{Tb}_{14} \text{--} \text{Sm}_{12} \text{--} \text{Ba}_{11} \text{--} \text{Ce}_{8,2} \text{--} \text{Sr}_6 \text{--} \text{Ta}_{5,3} \text{--} \text{Th}_{4,8} \text{--} \text{Lu}_{3,3} \text{--} \text{Hf}_3 \text{--} \text{Cs}_{2,2} \text{--} \text{Ca}_{2,1} \text{--} \text{Nd}_2 \text{--} \text{Sc}_2 \text{--} \text{Hg}_{1,9} \text{--} \text{Fe}_{1,8} \text{--} \text{Rb}_{1,7} \text{--} \text{Co}_{1,4} \text{--} \text{Eu}_{1,2} \text{--} \text{Zn}_{0,9} \text{--} \text{Sb}_{0,5} \text{--} \text{Cr}_{0,3} \text{--} \text{As}_{0,3}$	129, высокий
2022	$\text{U}_{19} \text{--} \text{Yb}_{18} \text{--} \text{Tb}_{17} \text{--} \text{La}_{15} \text{--} \text{Sm}_{11} \text{--} \text{Ba}_{10} \text{--} \text{Ce}_{9,3} \text{--} \text{Ca}_{6,6} \text{--} \text{Sr}_{5,2} \text{--} \text{Ta}_{4,7} \text{--} \text{Th}_{3,8} \text{--} \text{Lu}_{3,4} \text{--} \text{Nd}_3 \text{--} \text{Hf}_{2,8} \text{--} \text{Sc}_{2,3} \text{--} \text{Hg}_2 \text{--} \text{Co}_{1,9} \text{--} \text{Fe}_{1,8} \text{--} \text{Eu}_{1,4} \text{--} \text{Rb}_{1,4} \text{--} \text{Cs}_{1,4} \text{--} \text{Zn}_{1,3} \text{--} \text{Sb}_{1,1} \text{--} \text{Cr}_{0,5} \text{--} \text{As}_{0,2}$	128, высокий
2023	$\text{U}_{22} \text{--} \text{Tb}_{16} \text{--} \text{Yb}_{15} \text{--} \text{La}_{15} \text{--} \text{Ba}_{11} \text{--} \text{Sm}_{9,2} \text{--} \text{Sr}_{9,1} \text{--} \text{Ce}_{7,9} \text{--} \text{Ca}_{4,9} \text{--} \text{Th}_{3,6} \text{--} \text{Lu}_3 \text{--} \text{Hf}_{2,8} \text{--} \text{Hg}_{2,6} \text{--} \text{Ta}_{2,3} \text{--} \text{Nd}_2 \text{--} \text{Sc}_2 \text{--} \text{Co}_2 \text{--} \text{Fe}_{1,9} \text{--} \text{Eu}_{1,6} \text{--} \text{Rb}_{1,6} \text{--} \text{Cs}_{1,6} \text{--} \text{Zn}_{1,5} \text{--} \text{Sb}_{0,9} \text{--} \text{Cr}_{0,6} \text{--} \text{As}_{0,3}$	122, средний

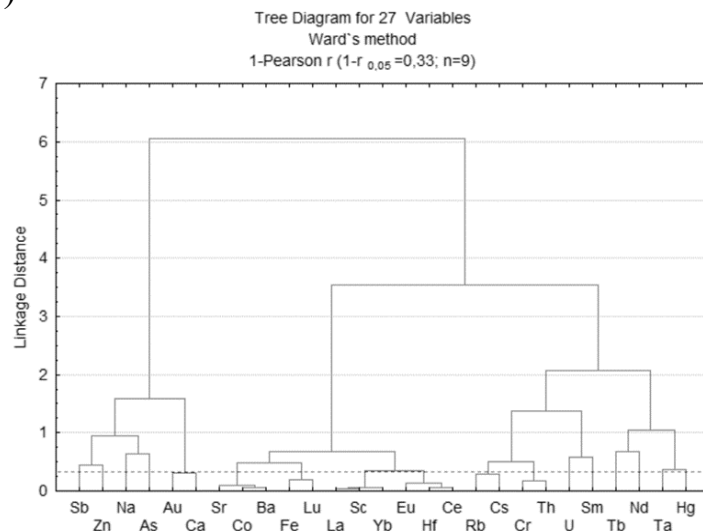
Примечание: субскрипты – значения K_c ; **полужирным шрифтом** выделены элементы с наиболее интенсивным накоплением; *курсивом* – с менее интенсивным накоплением; обычным шрифтом – элементы близкие к фоновым концентрациям; * – градация по Сауту Ю.Е. с соавторами (Геохимия..., 1990).

Во время наблюдений в нерастворимой фракции снежного покрова сохраняется геохимическая ассоциация Sc–La–Ce–Yb–Lu–Hf, в которой определены высокие корреляционные взаимосвязи между элементами ($r \approx 0,84-0,99$) (рисунок 5.2.4, таблицы 5.2.4-5.2.6.)

a)



б)



в)

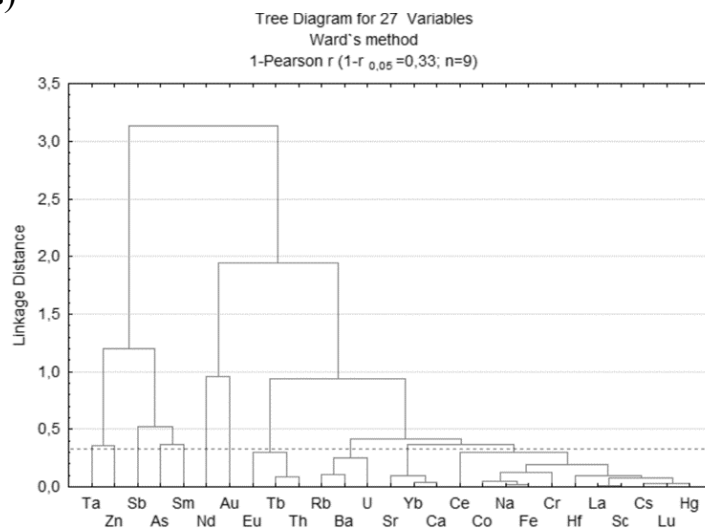


Рисунок 5.2.4 – Дендрограммы корреляционной матрицы геохимического спектра элементов проб нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово: а) 2016 г. б) 2022 г. в) 2023 г.

Таблица 5.2.4 – Матрица коэффициентов парной корреляции содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в 2016 г.

	Sm	Ce	Ca	Lu	U	Th	Cr	Yb	Hf	Ba	Sr	Nd	As	Br	Cs	Tb	Sc	Rb	Fe	Zn	Ta	Co	Na	Eu	La	Sb	Hg
Sm	1,0																										
Ce	0,8	1,0																									
Ca	0,8	0,8	1,0																								
Lu	0,9	0,9	0,8	1,0																							
U	0,7	0,7	0,8	0,8	1,0																						
Th	0,9	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0																					
Cr	0,8	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0																				
Yb	1,0	0,9	0,8	1,0	0,7	1,0	0,8	1,0																			
Hf	0,9	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0	0,9	1,0	1,0																		
Ba	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	1,0																	
Sr	0,6	0,8	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	1,0																
Nd	0,5	0,7	0,7	0,5	0,4	0,5	0,6	0,6	0,5	0,4	0,6	1,0															
As	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,5	0,5	0,4	0,5	0,3	1,0														
Br	-0,2	0,04	0,2	-0,2	-0,02	-0,2	-0,1	-0,2	-0,1	-0,3	0,2	0,1	-0,1	1,0													
Cs	0,9	0,9	0,7	1,0	0,8	1,0	0,8	0,9	1,0	0,9	0,7	0,4	0,5	-0,2	1,0												
Tb	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7	0,8	0,6	0,7	0,8	0,7	0,6	0,2	0,7	-0,02	0,8	1,0											
Sc	0,9	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0	0,9	1,0	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5	-0,1	1,0	0,8	1,0										
Rb	0,9	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0	0,8	1,0	1,0	0,9	0,7	0,5	0,5	-0,1	1,0	0,8	1,0	1,0									
Fe	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8	0,5	0,7	0,4	-0,1	0,7	0,4	0,8	0,8	1,0								
Zn	0,7	0,5	0,6	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6	0,7	0,8	0,3	0,3	0,4	-0,5	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6	1,0							
Ta	0,8	0,8	0,6	0,7	0,6	0,8	0,6	0,8	0,8	0,7	0,5	0,5	0,2	-0,2	0,8	0,6	0,8	0,8	0,6	0,5	1,0						
Co	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,6	0,6	0,5	-0,2	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	1,0					
Na	0,3	0,4	0,2	0,4	0,3	0,4	0,02	0,4	0,4	0,3	0,5	-0,1	0,2	0,2	0,5	0,7	0,4	0,5	-0,1	0,1	0,5	0,1	1,0				
Eu	0,9	1,0	0,8	0,9	0,8	1,0	0,9	0,9	1,0	0,9	0,7	0,5	0,4	-0,1	0,9	0,7	1,0	1,0	0,8	0,6	0,8	0,9	0,3	1,0			
La	0,8	0,9	0,7	0,9	0,8	1,0	0,8	0,9	0,9	0,9	0,7	0,4	0,4	-0,2	0,9	0,8	0,9	1,0	0,7	0,7	0,7	0,9	0,4	1,0	1,0		
Sb	0,8	0,6	0,6	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,7	0,9	0,4	0,3	0,4	-0,5	0,8	0,6	0,8	0,8	0,7	0,9	0,6	0,8	0,1	0,7	0,7	1,0	
Hg	0,6	0,6	0,5	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,3	0,5	0,4	-0,3	0,6	0,4	0,6	0,6	0,7	0,7	0,4	0,8	-0,2	0,7	0,7	0,7	

Примечание: n = 14; критическое значение коэффициента корреляции 0,52 при доверительной вероятности 0,01; **полужирный шрифт** – значимые корреляционные связи.

Таблица 5.2.5 – Матрица коэффициентов парной корреляции содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в 2022 г.

	Sm	Ce	Ca	Lu	U	Th	Cr	Yb	Hf	Ba	Sr	Nd	As	Cs	Tb	Sc	Rb	Fe	Zn	Ta	Co	Na	Eu	La	Sb	Hg
Sm	1,0																									
Ce	-0,2	1,0																								
Ca	0,2	-0,6	1,0																							
Lu	-0,4	0,6	-0,1	1,0																						
U	0,4	0,2	-0,1	-0,5	1,0																					
Th	0,5	0,4	-0,1	0,4	-0,02	1,0																				
Cr	0,5	0,1	-0,1	0,02	0,03	0,8	1,0																			
Yb	0,1	0,8	-0,4	0,7	-0,1	0,5	0,2	1,0																		
Hf	-0,03	0,9	-0,5	0,7	0,1	0,5	0,2	0,9	1,0																	
Ba	0,05	0,6	-0,2	0,8	-0,2	0,8	0,3	0,7	0,6	1,0																
Sr	-0,2	0,6	-0,4	0,8	-0,4	0,6	0,1	0,7	0,7	0,9	1,0															
Nd	0,3	0,3	-0,6	0,2	-0,2	0,4	0,6	0,5	0,4	0,2	0,3	1,0														
As	-0,7	0,3	-0,3	0,1	-0,1	-0,5	-0,3	0,03	0,2	-0,4	-0,2	-0,1	1,0													
Cs	0,3	0,3	-0,2	0,4	-0,4	0,7	0,5	0,5	0,3	0,7	0,6	0,4	-0,3	1,0												
Tb	0,3	-0,2	0,3	-0,1	-0,1	-0,2	0,02	0,1	0,002	-0,4	-0,4	0,3	0,1	-0,2	1,0											
Sc	0,04	0,7	-0,2	0,9	-0,3	0,6	0,3	0,9	0,9	0,8	0,8	0,5	-0,1	0,6	0,03	1,0										
Rb	0,6	0,4	-0,2	0,1	0,2	0,7	0,6	0,5	0,4	0,5	0,3	0,4	-0,3	0,7	-0,2	0,5	1,0									
Fe	-0,05	0,5	-0,1	0,8	-0,3	0,4	0,1	0,7	0,7	0,6	0,6	0,4	-0,1	0,1	0,3	0,8	-0,1	1,0								
Zn	-0,4	-0,6	0,1	-0,5	-0,2	-0,7	-0,4	-0,6	-0,6	-0,8	-0,6	-0,2	0,5	-0,3	0,03	-0,6	-0,4	-0,7	1,0							
Ta	-0,2	0,6	-0,7	0,1	0,3	-0,1	-0,3	0,4	0,5	0,2	0,3	0,3	0,2	-0,2	-0,02	0,2	-0,1	0,3	-0,3	1,0						
Co	0,1	0,7	-0,2	0,8	-0,2	0,7	0,3	0,8	0,8	0,9	0,9	0,3	-0,3	0,6	-0,2	0,9	0,5	0,7	-0,8	0,2	1,0					
Na	-0,5	-0,2	0,3	0,2	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,2	-0,3	-0,2	-0,3	0,4	-0,5	0,0	-0,04	-0,5	0,2	0,3	-0,4	-0,2	1,0				
Eu	-0,1	0,9	-0,3	0,8	0,1	0,4	-0,03	0,8	0,9	0,8	0,7	0,1	-0,03	0,2	-0,1	0,8	0,3	0,7	-0,8	0,5	0,8	-0,2	1,0			
La	-0,1	0,8	-0,3	0,9	-0,3	0,5	0,2	0,9	0,9	0,8	0,8	0,4	0,2	0,5	-0,04	1,0	0,4	0,7	-0,5	0,2	0,9	-0,1	0,8	1,0		
Sb	-0,4	-0,4	0,3	-0,4	0,1	-0,4	-0,3	-0,8	-0,6	-0,4	-0,5	-0,8	0,2	-0,2	-0,4	-0,7	-0,4	-0,7	0,6	-0,3	-0,6	0,002	-0,5	-0,6	1,0	
Hg	-0,01	0,5	-0,5	0,1	0,1	0,01	-0,1	0,5	0,6	0,2	0,3	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,1	-0,1	0,6	0,2	-0,7	0,4	0,4	-0,2	1,0

Примечание: n = 9; критическое значение коэффициента корреляции 0,66 при доверительной вероятности 0,01; **полужирный шрифт** – значимые корреляционные связи.

Таблица 5.2.6 – Матрица коэффициентов парной корреляции содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова в 2023 г.

	Sm	Ce	Ca	Lu	U	Th	Cr	Yb	Hf	Ba	Sr	Nd	As	Cs	Tb	Sc	Rb	Fe	Zn	Ta	Co	Na	Eu	La	Sb	Hg
Sm	1,0																									
Ce	0,5	1,0																								
Ca	0,6	0,8	1,0																							
Lu	0,7	0,8	0,9	1,0																						
U	0,4	0,6	0,8	0,9	1,0																					
Th	0,7	0,6	0,8	0,8	0,8	1,0																				
Cr	0,7	0,6	0,9	0,9	0,7	0,9	1,0																			
Yb	0,7	0,9	1,0	0,9	0,7	0,8	0,8	1,0																		
Hf	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0																	
Ba	0,5	0,6	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	1,0																
Sr	0,6	0,7	0,9	0,7	0,6	0,7	0,7	0,9	0,7	0,7	1,0															
Nd	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,3	0,5	0,3	0,3	0,4	1,0														
As	0,6	0,04	0,1	0,2	-0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	0,1	0,2	-0,5	1,0													
Cs	0,6	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,7	0,4	0,2	1,0												
Tb	0,7	0,6	0,7	0,7	0,5	0,9	0,8	0,8	0,8	0,7	0,6	0,3	0,3	0,6	1,0											
Sc	0,6	0,9	0,9	1,0	0,8	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,8	0,5	0,1	0,9	0,8	1,0										
Rb	0,6	0,6	0,9	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,1	0,4	0,8	0,7	0,8	1,0									
Fe	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,9	0,5	0,2	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0								
Zn	-0,2	-0,7	-0,2	-0,3	-0,2	-0,1	0,04	-0,4	-0,4	-0,1	-0,2	-0,4	0,2	-0,3	-0,1	-0,4	-0,2	-0,4	1,0							
Ta	0,5	-0,2	0,3	0,3	0,1	0,3	0,6	0,2	0,2	0,3	0,4	-0,2	0,6	0,3	0,3	0,1	0,4	0,3	0,6	1,0						
Co	0,7	0,7	0,9	0,9	0,7	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,8	0,4	0,3	0,9	0,7	0,9	0,8	0,9	-0,2	0,4	1,0					
Na	0,7	0,8	0,9	0,9	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,4	0,3	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0	-0,3	0,4	1,0	1,0				
Eu	0,6	0,4	0,5	0,6	0,6	0,7	0,7	0,4	0,7	0,7	0,3	0,1	0,3	0,6	0,8	0,6	0,5	0,5	-0,1	0,2	0,6	0,6	1,0			
La	0,6	0,8	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,5	0,1	0,9	0,8	1,0	0,8	1,0	-0,3	0,2	0,9	1,0	0,6	1,0		
Sb	0,6	0,5	0,6	0,6	0,2	0,4	0,7	0,7	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,7	-0,002	0,5	0,7	0,7	0,1	0,6	1,0	
Hg	0,6	0,9	0,9	1,0	0,8	0,7	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,4	0,2	1,0	0,6	1,0	0,8	1,0	-0,4	0,2	0,9	0,9	0,5	1,0	0,6	1,0

Примечание: n = 9; критическое значение коэффициента корреляции 0,66 при доверительной вероятности 0,01; **полужирный шрифт** – значимые корреляционные связи.

Установленная группа элементов (Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, Hf, Ta, Hg, Th, U и лантаноиды), устойчиво повторяющаяся в нерастворимой фракции снежного покрова в течение трехлетнего мониторинга, может быть использована в качестве индикаторов геохимического воздействия предприятий теплоэнергетики и коксохимии на окружающую среду в городе.

Статистически достоверно определено, что концентрации выделенной индикаторной группы элементов в пробах имеют высокую и очень высокую корреляционную связь с составом угля, золы уноса и объемами потребления топлива на ГРЭС (таблица 5.2.7), что свидетельствует о влиянии данных факторов на формирование геохимической специфики нерастворимой фракции снежного покрова.

Таблица 5.2.7 – Корреляционная зависимость содержаний химических элементов в системе «нерастворимая фракция снежного покрова – уголь – зола уноса – потребление топлива на ГРЭС»

Значения r^*	от 0,2 до 0,37	от 0,37 до 0,63	от 0,63 до 0,8	от 0,8 до 1
Тип связи*	слабая	средняя	высокая	очень высокая
Нерастворимая фракция – уголь**				
Элементы	Sr, La, As, Co, Sm	Yb, Tb, Hf, U, Eu, Lu, Sc, Sb, Zn	–	–
Нерастворимая фракция – зола уноса				
Элементы	–	As, Rb, Sm, Na	Fe, Cs, Sc, Ca, Th, Ta	U, Yb, Hf, Ba, Sr, Cr, Sb, Co, Nd, Ce, Lu, Tb, Zn, Eu, La
Нерастворимая фракция – потребление топлива на ГРЭС***				
Элементы	Zn	Ce, Th, Cs, Eu, La	Tb	U, Yb, Hf, Ba, Sr, Cr, Sb, Co, Fe, Sc, Rb, Sm, Ca, As, Ta, Na

Примечание: r – коэффициент корреляции; * – вербально-числовая шкалы Харрингтона (Адлер и др., 1976); ** – данные по составу углей предоставлены С.И. Арбузовым, д.г.-м.н., профессором ОГ ИШПР ТПУ; *** – данные с официального источника о схеме теплоснабжения г. Кемерово

Геохимический спектр элементов отражает специфику состава нерастворимой фракции снежного покрова в районе изучаемых предприятий и имеет высокую и очень высокую корреляционную связь с составом золы уноса. Кузнецкие угли специализированы на U, Th, лантаноидах, а также содержат тяжелые металлы (Арбузов и др., 2007; 2011).

В процессе сжигания угля образуется дымовой газ, в котором сопутствующими элементами являются Hg, As, Br. Многие элементы фиксируются в составе тонкодисперсной пылевой фракции выбросов от сжигания угля (Юдович и др., 2005).

В снежном покрове в зоне воздействия ТЭЦ г. Новосибирска для As, Br преобладает растворенная форма, а для K, Ca, Rb, Y, Zr, Nb, Th и др. – взвешенная (Бортникова и др., 2009). В нерастворимой фракции снежного покрова г. Иркутска содержатся V, Cr, Fe, Ni, Cu, Sr (> 80 % от общего содержания) (Онищук, 2010). Коксохимическое производство является источником эмиссии ртути в окружающую среду (Геохимия..., 1990; Янин, 2004; 2012).

Дополнительно, результаты корреляционного и факторного анализа показывают влияние метеопараметров (температура воздуха, скорость ветра, относительная влажность и количество осадков) на накопление индикаторной группы элементов в нерастворимой фракции снежного покрова (таблица 5.2.8). Элементы-индикаторы, выделенные в составе нерастворимой фракции снежного покрова, отражают сильную положительную корреляционную зависимость от температуры воздуха, скорости ветра и количества осадков. В то же время установлены отрицательные корреляционные связи между содержанием в нерастворимой фракции снежного покрова Sm, Lu, Yb, Ta, Ce и температурой воздуха; Hg и Sr – со скоростью ветра; Lu, Hf, La, Th, Yb, Ta – с относительной влажностью воздуха; U, Hf, Ba, Cs – с количеством осадков (таблица 5.2.8).

Таблица 5.2.8 – Корреляционная зависимость элементов-индикаторов в системе «нерастворимая фракция снежного покрова – метеопараметры»

Элемент	Содержание элемента в нерастворимой фракции снежного покрова			
	температура воздуха	скорость ветра	относительная влажность воздуха	осадки
Ca	–0,08	–0,5	0,54	0,97
Sc	–0,79	0,3	–0,26	0,84
Sr	0,99	–0,9	0,82	–0,30
Cs	–0,09	0,6	–0,68	–0,91
Ba	0,38	0,2	–0,26	–0,99
La	–0,64	0,9	–0,97	–0,52
Ce	–0,83	0,4	–0,33	0,80
Nd	–0,69	0,2	–0,11	0,91

Продолжение таблицы 5.2.8

Элемент	Содержание элемента в нерастворимой фракции снежного покрова			
	температура воздуха	скорость ветра	относительная влажность воздуха	осадки
Sm	–0,98	0,9	0,91	0,1
Tb	0,05	–0,6	0,65	0,92
Yb	–0,98	0,9	–0,89	0,16
Lu	– 0,99	0,9	– 0,83	–0,27
Hf	–0,29	0,8	–0,81	–0,80
Ta	–0,93	0,99	–0,97	–0,05
Hg	0,96	– 0,99	0,94	–0,04
Th	–0,41	0,8	–0,88	–0,72
U	0,22	0,3	–0,41	–0,99

Примечание: полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты корреляции ($p > 0,95$), данные по метеопараметрам – world-weather.ru

Приведены результаты многофакторного анализа по методу главных компонентов для данных за 2016–2023 гг. по концентрациям элементов проб нерастворимой фракции снежного покрова и метеоданным (таблица 5.2.9). Распределение данных по факторам происходит в зависимости от коэффициента корреляции, который превышает 0,7, что доказывает достоверную связь. Первый фактор обусловлен 70 % дисперсии распределения содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и метеопараметров. Второй фактор отвечает за 30 % дисперсии содержания элементов и метеопараметров.

Таблица 5.2.9 – Факторный анализ взаимосвязи содержания химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова и метеопараметров

№ фактора	Элементы	Переменные, определяющие фактор	Вес фактора
1	Na, Cr, Fe, Zn , As, Rb , Sr, Sb, Cs, Tb, Ta	Температура воздуха Скорость ветра	70
2	Ca, Sc, Co, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Eu, Yb, Lu, Hf, Th, U	Скорость ветра Относительная влажность воздуха	30

Примечание: полужирным шрифтом выделены индикаторные элементы в нерастворимой фракции снежного покрова для района исследования.

По результатам факторного анализа (таблица 5.2.9) была выделена такая же взаимосвязь между температурой воздуха, скоростью ветра, относительной влажностью воздуха и концентрацией элементов в разные периоды наблюдений, что подтверждает влияние метеорологического фактора на формирование геохимической специфики нерастворимой фракции снежного покрова.

5.3 Химический состав снеготалой воды в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства

Водородный показатель (рН) снеготалой воды в районе размещения предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства г. Кемерово изменяется от 6,1 до 6,3 единиц при средней величине 6,2 ед., что соответствует слабощелочной среде и отличается от рН для снеготалых вод фоновых территорий (5,2 ед.; Филимоненко, 2015; Таловская, 2022). Повышение рН снеготалой воды из окрестностей рассматриваемых промышленных предприятий г. Кемерово по сравнению с фоновыми пробами связано с повышенным содержанием взвешенных частиц в снежном покрове, что отражается в уровне пылевой нагрузки, представленной в разделе 5.2. Твердые частицы, присутствующие в атмосферном воздухе, представлены в основном пылью, содержащей оксиды металлов, карбонаты кальция и другие соединения щелочных и щелочноземельных металлов, которые и обладают подщелачивающей способностью (Микушин и др., 2006; Свистов, 2011). Стоит отметить, что слабощелочная реакция среды снеготалой воды характерна для многих городских территорий, что подтверждается исследованиями не только в Кемерово, но и в Томске (Филимоненко, 2015; Таловская, 2022), Москве (Касимов и др., 2016), Тюмени и Тобольске (Московченко, 1998; Московченко и Бабушкин, 2012; Московченко и др., 2021).

Выявлено, что в снеготалой воде концентрации большинства изучаемых элементов превышает фон более, чем в 2 раза. Выявленные элементы-индикаторы для нерастворимой фракции снежного покрова также превышают фон в снеготалой воде: La, Ce, Nd, Tb, Yb, Hf, Ta выше фона от 2 до 5 раз, Ca, Sr, Cs, Ba, Th, U, Sm – от 6 до 17 раз (рисунок 5.3.1).

По мере удаления от предприятий изменялось содержание индикаторных химических элементов в снеготалой воде (рисунок 5.3.2). Определено преимущественно увеличение содержания Sr, Cs, Hf, Th и Ba и снижение концентрации Ca и U в пробах по мере удаления от изучаемой промышленной зоны на расстоянии от 0,5 до 4,5 км.

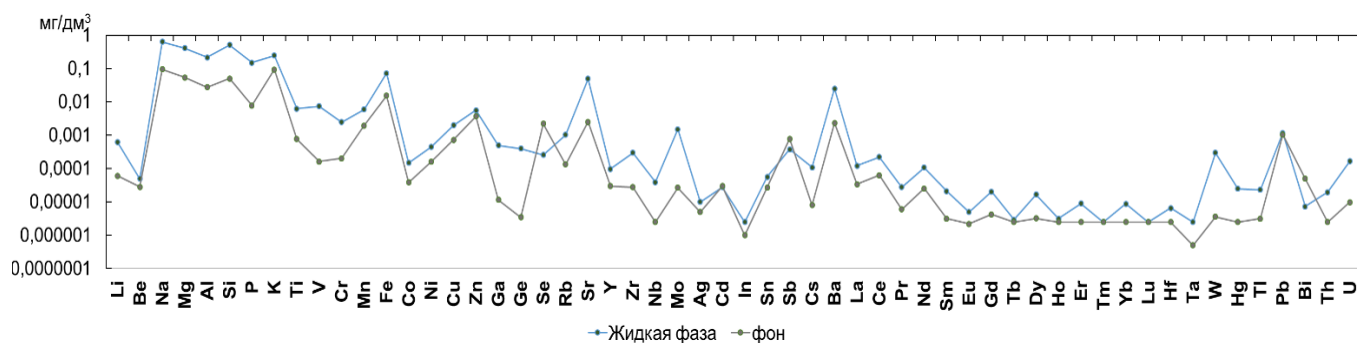


Рисунок 5.3.1 – Содержание химических элементов в снеготалой воде в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимического производства г. Кемерово (фон по данным Филимоненко, 2015; Таловская, 2022)

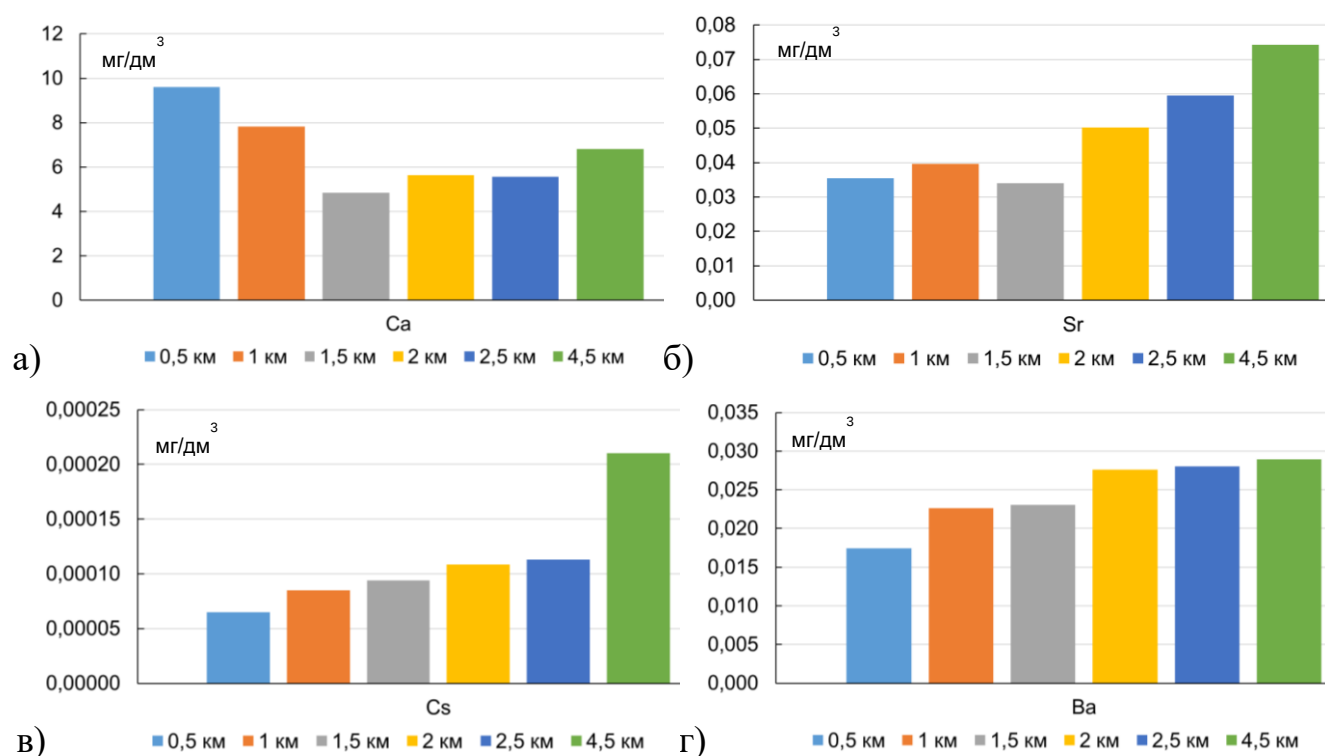


Рисунок 5.3.2 – Содержание индикаторных химических элементов в снеготалой воде по мере удаления от предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии в г. Кемерово: а) кальций; б) стронций; в) цезий; г) барий; д) гафний; е) торий; ж) уран

Исследовалось изменение содержания органических соединений (массовая концентрация нефтепродуктов, летучих органических соединений и фенолов) в зависимости от удаления от изучаемых источников воздействия (рисунок 5.3.3).

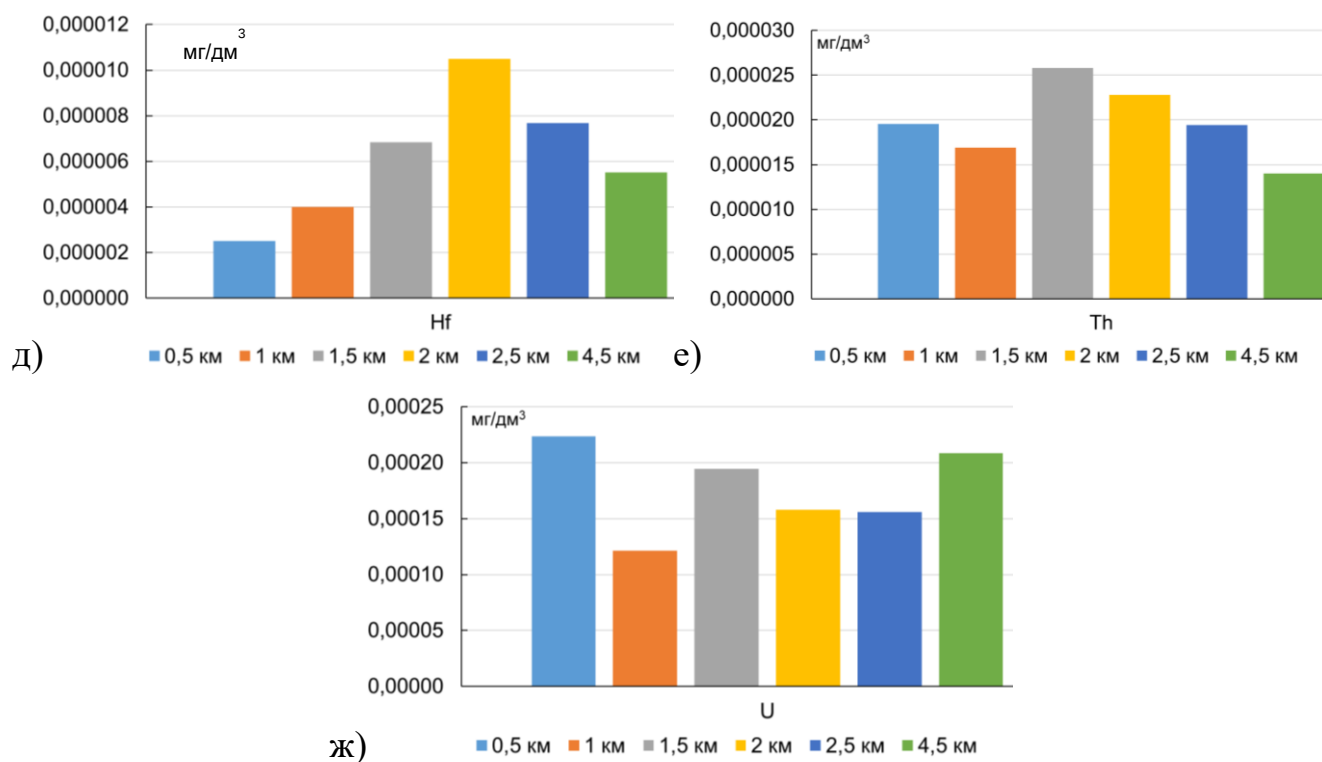


Рисунок 5.3.2 (продолжение)

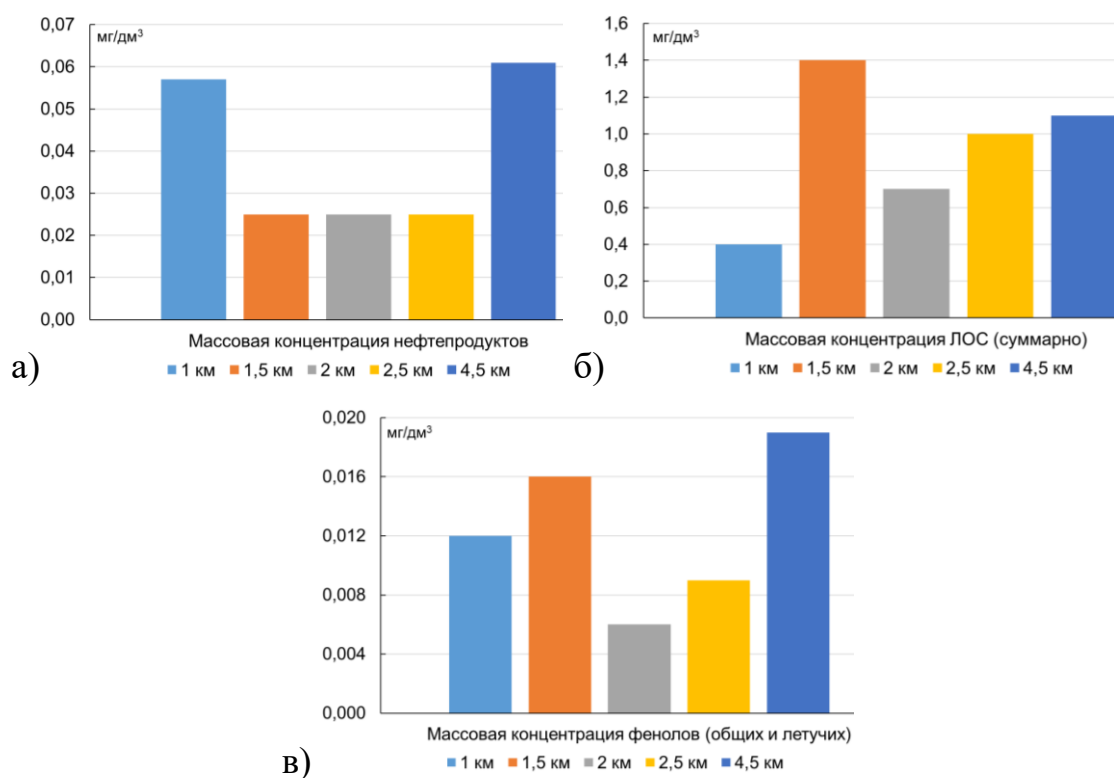


Рисунок 5.3.3 – Массовая концентрации органических соединений в снеготалой воде по мере удаления от предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии в г. Кемерово: а) нефтепродукты; б) летучие органические соединения (суммарно); в) фенолы (общих и летучих)

Выявлено снижение концентрации нефтепродуктов в пробах на расстоянии от 1 до 2,5 км. Массовая концентрация ЛОС характеризуется тенденцией к увеличению по мере удаления на расстояние от 1 до 4,5 км. На расстоянии 1-1,5 км концентрация фенолов в снеготалой воде выше таковых на дистанции 2,5 км. Появление пика концентрации нефтепродуктов и фенолов на расстоянии 4,5 км вероятно связано с локальным источником.

Исследования, проведенные Рапутой В.Ф. с коллегами (Рапута и др., 2011) показали, что уровни загрязнения на преобладающих направлениях сноса вредных примесей весьма, включая полиароматические углеводороды, значительны даже на расстояниях нескольких десятков километров от городских территорий.

Таким образом, геохимическая характеристика нерастворимой фракции снежного покрова на территории г. Кемерово проявляется в превышении от 2 до 22 раз над фоном концентраций 23 изучаемых химических элементов ($U > Yb > Tb > La > Sm > Ba > Ce > Sr > Ca > Ta > Na > Th > Lu > Hf > Nd > Sc > Hg > Co > Fe > Zn > Cs > Sb > Rb$), формирующие средний уровень загрязнения снежного покрова ($Z_c = 124$), и геохимическими ассоциациями ($Ba-Sr$; $Ta-Th-Cs-Rb$; $Nd-Ce$; $U-Eu-Co-Hf-La-Yb-Lu-Sc$; $Sb-Zn$; $Br-Cr$; $Hg-As$; $Fe-Na$).

Обработка геохимических данных с помощью факторного, корреляционного, K-средних, кластерного методов анализа позволила выделить атмогеохимические ореолы (зоны) на территории города, различающихся по уровням накопления и ассоциациям изучаемых химических элементов в нерастворимой фракции снежного покрова, и пространственному расположению. Для первой зоны характерна ассоциация $Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Ta-Th-U$ в нерастворимой фракции снежного покрова, в которой отмечаются минимальные средние концентрации элементов относительно остальных зон. Территория зоны занимает незначительную часть города. Вторая геохимическая зона отличается максимальными средними концентрациями Ca, Tb, Sc, Fe, Na и минимальными концентрациями Cs, Ta, Th, Hg в пробах относительно третьей зоны. Зона располагается на большей части города, вероятно отражая процессы дальнего массопереноса вещества от промышленных предприятий. Для

нерастворимой фракции снежного покрова в третьей зоне максимальные средние концентрации Cs, Ta, Th и низкие содержания Ca и Hg относительно второй зоны, а максимальные средние уровни накопления Sm, Ce, Lu, Yb, Hf, Nd, Rb, Eu, La в пробах выделяются относительно всех зон. Зона приурочена к территории влияния теплоэнергетической и химической промышленности. Четвертая геохимическая зона преимущественно сформирована влиянием автотранспорта за счет ассоциации Cr–Co–Zn–Br–Sb в нерастворимой фракции снежного покрова.

В нерастворимой фракции снежного покрова на территории воздействия предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии г. Кемерово из 27 изучаемых элементов уровни концентраций 17 элементов (Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Sm, Tb, Yb, Lu, Hf, Ta, Hg, Th, U) не изменяются на протяжении периода наблюдений (2016-2023 гг.). Превышение фоновых концентраций данных элементов фиксируется от 2 до 24 раз, что отражает геохимическую специфику состава нерастворимой фракции снежного покрова на изучаемой территории. На протяжении трех лет в пробах сохраняется устойчивая геохимическая ассоциация с высокими корреляционными взаимосвязями между элементами Sc–La–Ce–Yb–Lu–Hf. Статистически достоверно определено, что концентрации выделенной индикаторной группы элементов в пробах имеют высокую корреляционную связь с составом угля, золы уноса и объемами потребления топлива на ГРЭС, а также некоторыми метеопараметрами, что свидетельствует о влиянии данных факторов на формирование геохимической специфики нерастворимой фракции снежного покрова.

Для снеготалой воды установлен слабощелочной pH (6,2 ед.), отличающийся от слабокислой реакции фоновых проб. Концентрации индикаторных элементов в снеготалой воде также превышают фоновые значения в 2-17 раз. Дополнительно отмечается, что наличие в снежном покрове положительной корреляционной зависимости между содержаниями мышьяка и ртути, мышьяком и летучими органическими соединениями, ртутью и фенолами может свидетельствовать о поступлении данных микроэлементов от общих техногенных источников.

Глава 6. Минерально-вещественная характеристика нерастворимой фракции снежного покрова в окрестностях предприятий теплоэнергетики г. Кемерово

По результатам исследования минерально-вещественного нерастворимой фракции снежного покрова на всей территории г. Кемерово встречались природные (кварц, полевые шпаты, растительные остатки) и техногенные (алюмосиликатные микросферулы, металлические микросферулы (ферросферулы), угольные, волокнистые и шлак) образования (частицы) (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Количественная оценка минерально-вещественного состава нерастворимой фракции снежного покрова на территории и в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики г. Кемерово (данные бинокулярной микроскопии)

Тип частиц	Город, %	В зоне влияния предприятий, %	Фон*, %
Природные частицы:	37,8 (8,5 – 77,3)	22,7 (9,6 – 58,7)	76
Кварц	17,9 (4,3 – 38,1)	14,1 (6,1 – 27,8)	60
Полевые шпаты	7,8 (2,2 – 12,8)	4,1 (1,3 – 8,6)	8
Растительные остатки	12,1 (2,0 – 26,4)	4,5 (2,2 – 22,3)	6
Техногенные частицы:	62,2 (22,7 – 91,5)	77,3 (41,3 – 90,4)	24
Алюмосиликатные микросферулы	18,7 (2,4 – 40,1)	24,8 (8,4 – 33,7)	7
Металлические микросферулы (ферросферулы)	3,2 (2,3 – 21,1)	6 (2,6 – 17,2)	1
Угольные частицы	14,2 (6,2 – 28,3)	15,8 (6,4 – 28,3)	7
Волокнистые частицы	6,5 (1,8 – 18,2)	4,3 (2,5 – 14,7)	1
Шлак	19,6 (6,4 – 37,2)	26,4 (17,8 – 37,2)	8

Примечание: среднее (минимальное – максимальное) содержание в %; * – Таловская, 2022

Природная составляющая нерастворимой фракции снежного покрова включает преимущественно минеральные образования, источником которых могут выступать песко-соляная смесь, используемая при проведении против гололёдных мероприятий и ветровая эрозия открытых участков на берегах реки.

В нерастворимой фракции снежного определено доминирование техногенных образований над природными частицами. При сравнении с фоновыми содержаниями частиц в пробах, стоит отметить, что в г. Кемерово доля природных частиц около двух раз ниже. Содержание алюмосиликатных и металлических

микросферул, угольных частиц на территории города больше фоновых показателей от 2 до 3 раз.

В зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики техногенные частицы также преобладают в пробах. При сравнении содержания в пробах, отобранных по всей территории города, выявлено, что доля техногенных частиц выше в зоне влияния исследуемых предприятий. Основной вклад в формирование состава нерастворимой фракции снежного покрова вносят алюмосиликатные микросферулы, угольные частицы и шлак.

Согласно критериям типизации урбанизированных территорий по соотношению группы природных и техногенных образований в нерастворимом осадке снега (Таловская, 2022), на территории г. Кемерово формируется высокий уровень загрязнения техногенными образованиями (доля природных частиц 15-40 % и доля техногенных частиц 60-85 %). В зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики по соотношению изучаемых образований в нерастворимой фракции снежного покрова определен также высокий уровень загрязнения.

По результатам рентгенофазового анализа выявлено, что нерастворимая фракция снежного покрова в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики представлена кристаллической (48-58,8 %) и аморфной фазой (41,2-52 %) (таблица 6.2).

Таблица 6.2 – Количественная оценка минерального состава нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий угольной теплоэнергетики г. Кемерово (данные рентгенофазового анализа)

Содержание, %	Расстояние от границы ГРЭС, км			Расстояние от границ ТЭЦ, км	
	0,5	1,5	4,5	3	4
Аморфная фаза	51,2	46,7	52	43,2	41,2
Кристаллическая фаза:	48,8	53,3	48	56,8	58,8
Кварц	31,6	13,9	16,3	16,8	16,8
Муллит	13,2	19,5	23,1	28,9	30,1
Ортоклаз	н.о.	31,7	26,9	25,1	36,8
Альбит	40,1	34,9	33,6	29,2	16,3
Кальцит	15,2	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.

Примечание: н.о. – не обнаружено.

Соотношение кристаллических (минеральных) и аморфных фаз в нерастворимой фракции снежного покрова также позволяет оценить уровень загрязнения территории в соответствии с показателями типизации урбанизированных территорий (Таловская, 2022). В зоне влияния угольной теплоэнергетики г. Кемерово на расстоянии от 0,5 до 4,5 км отмечается преимущественно очень высокий уровень загрязнения (доля кристаллической фазы $\leq 72\%$ и доля аморфной фазы $\geq 42\%$).

Зола уноса ГРЭС представлена на 64,5 % кристаллической фазой и 35,5 % аморфной фазой (таблица 6.3). Состав золы уноса определяется прежде всего минеральным составом углей, который зависит от месторождения, методов обогащения и добычи. Зола уноса изучаемой ГРЭС, содержащая те же минералы, что и в пробах нерастворимой фракции снежного покрова – муллит и полевые шпаты, которые образуются в процессе сжигания угля и могут накапливаться в золе (Арбузов, 2007). Кварц также может содержаться в золе, если он присутствовал в неорганической части угля (Казакова и др., 2011).

Таблица 6.3 – Состав золы уноса ГРЭС (данные рентгенофазового анализа)

Содержание, %	Зола уноса
Аморфная фаза	35,5
Кристаллическая фаза:	64,5
Кварц	20,6
Анортит	29,7
Муллит	22
Альбит	27,8

Ранее проведенные нами исследования в зоне влияния предприятий теплоэнергетики г. Кемерово показали наличие в нерастворимой фракции снежного покрова индикаторных техногенных образований – муллит, микросферулы и микрочастицы, содержащие барий и редкоземельные элементы (Кирина и Таловская, 2019; 2021; Таловская, 2022). Анализ состава золы уноса подтверждает техногенное происхождение муллита в нерастворимой фракции снежного покрова (таблица 6.3; рисунок 6.1). Присутствие бария в угольной золе в карбонатной и сульфатной формах (Fruchter et al., 1990; Yossifova et al., 2007) является причиной обогащения им мелкодисперсных частиц в выбросах

теплоэлектростанций, работающих на угле (Bauer, 1988). Одним из источников частиц редкоземельного состава являются выбросы угольной золы, что подтверждается данными об обнаружении в золе предприятий теплоэнергетики сферических частиц фосфатов редкоземельных элементов размером ~ 5 мкм с алюмосиликатными примесями (Smolka-Danielowska, 2010).

По доле техногенных частиц-индикаторов и соотношению техногенных минералов-индикаторов к кварцу в нерастворимом осадке снега возможно охарактеризовать уровень загрязнения изучаемой территории (Таловская, 2022).

В нерастворимой фракции снежного покрова по мере удаления от источников эмиссии на расстоянии от 0,5 до 4,5 км доля муллита возрастает с 13 до 30 %, отношение муллит/кварц увеличивается от 0,4 до 1,8 ед. (рисунок 6.1), что соответствует среднему и высокому уровню загрязнения (величина отношения 0,1-1 и 1-2,5 ед., соответственно). Поскольку муллит входит в состав алюмосиликатных микросферул, с полый структурой, он имеет способность к дальнему атмосферному переносу от источника.

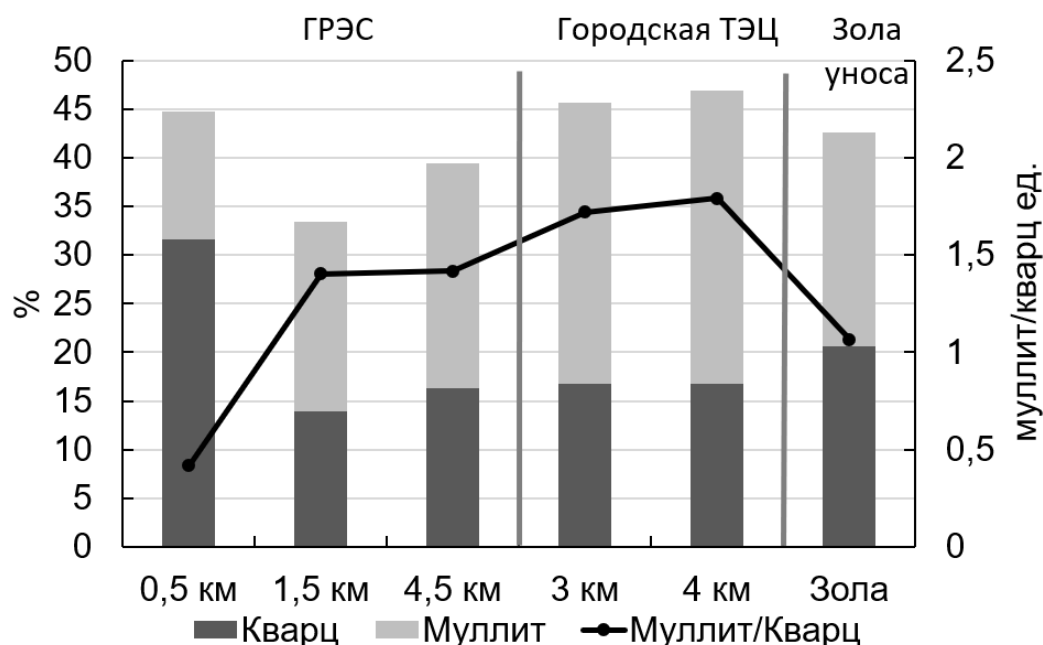


Рисунок 6.1 – Долевое содержание и отношение муллита к кварцу в нерастворимой фракции снежного покрова в зонах влияния предприятий теплоэнергетики г. Кемерово и золе уноса

В нерастворимой фракции снежного покрова преобладает содержание алюмосиликатных микросферул над остальными идентифицированными частицами (таблица 6.1), что также отчётливо видно на обзорных микроснимках проб в зоне влияния предприятий теплоэнергетики города (рисунок 6.2). Установлено, что встречаемость данных микросферул (в среднем масс. %: Al – 13, Si – 19, O – 24) в пробах возрастает от 60 до 85 % с расстоянием от предприятий теплоэнергетики (рисунок 6.3) и формирует очень высокий уровень загрязнения снежного покрова ($\geq 35\%$).

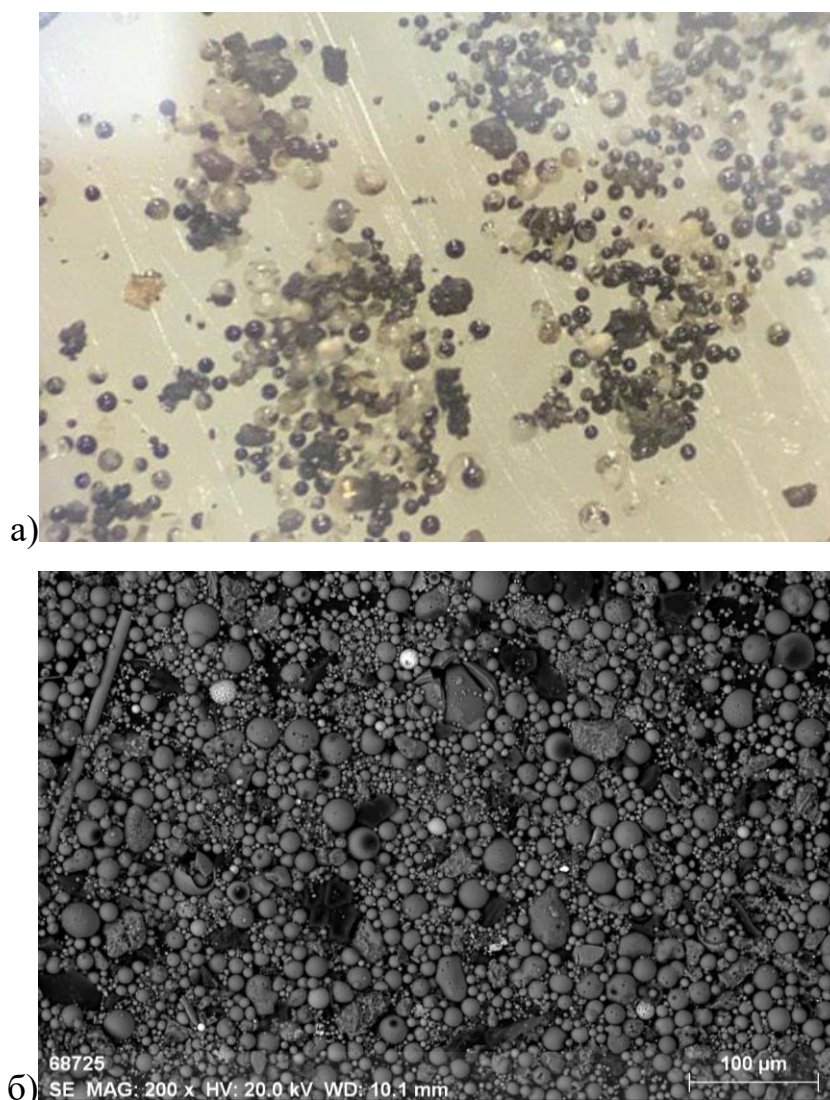


Рисунок 6.2 – Обзорные микрофотографии проб нерастворимой фракции снежного покрова в зоне влияния предприятий теплоэнергетики г. Кемерово: а) бинокулярный микроскоп (увеличение 35х); б) сканирующий электронный микроскоп (увеличение 200х)

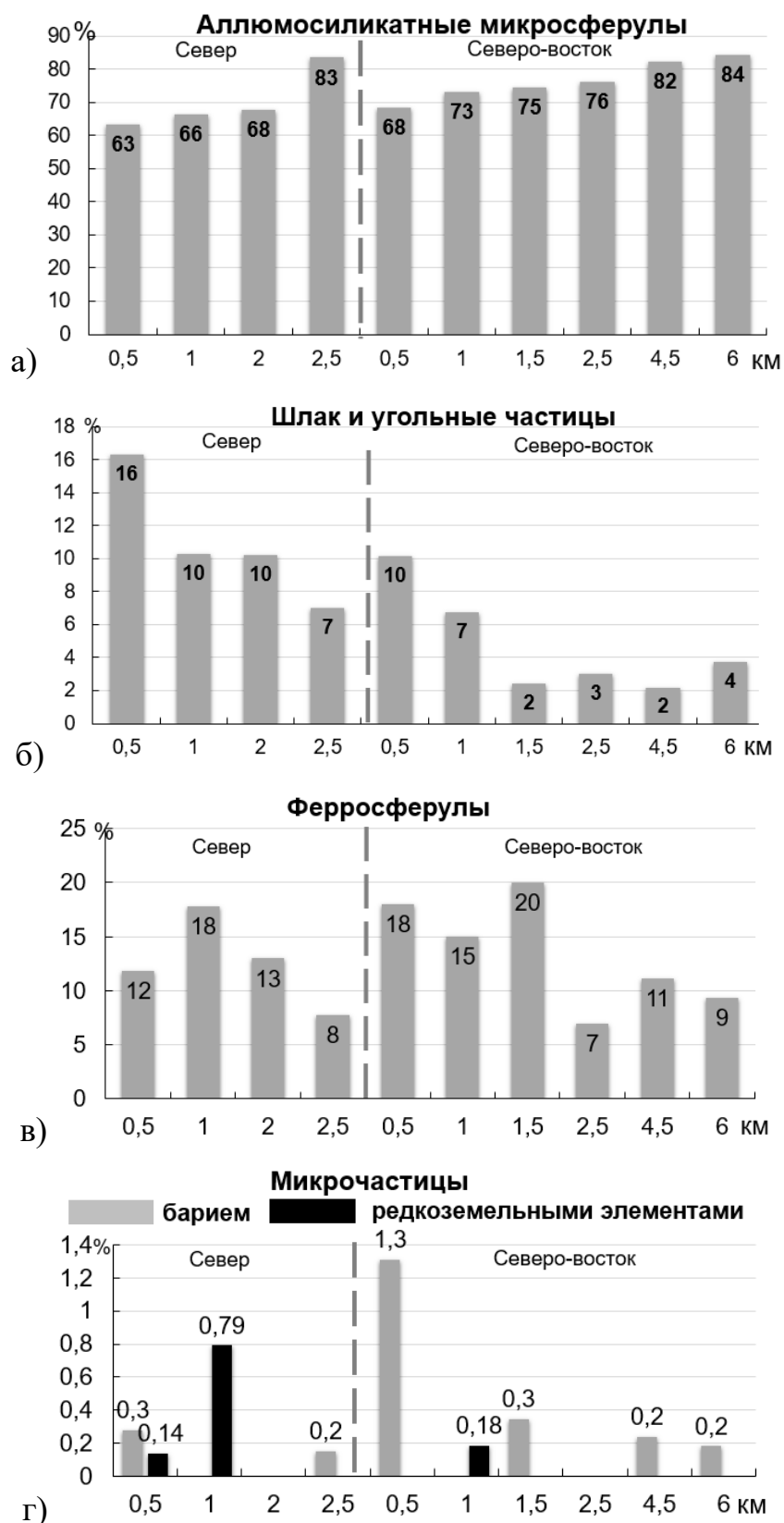


Рисунок 6.3 – Распределение техногенных образований-индикаторов в нерастворимой фракции снежного покрова в зонах влияния предприятий теплоэнергетики г. Кемерово: а) аллюмосиликатные микросферулы; б) шлак и угольные частицы; в) ферросферулы; г) микрочастицы с барием и редкоземельными элементами

Доля встречаемости шлака и угольных частиц снижается от 16 до 2 % в нерастворимой фракции по мере удаления от предприятий (рисунок 6.3). Их высокий процент в пробах вблизи источника вероятно связан с эффектом «ледяной крупы» в дымовых трубах ТЭЦ (Беляев и др., 1997), а также переносом частиц с открытых угольных складов изучаемых теплоэнергетических предприятий.

Частота встречаемости ферросферул (в среднем масс. %: Fe – 53, O – 31) в нерастворимой фракции снежного покрова не демонстрирует пространственной зависимости на изучаемой территории (рисунок 6.3).

В нерастворимой фракции снежного покрова в районе исследования микрочастицы, содержащие барий и редкоземельные элементы, преимущественно идентифицируются на расстоянии до 1,5 км от предприятий (рисунок 6.3-6.4).

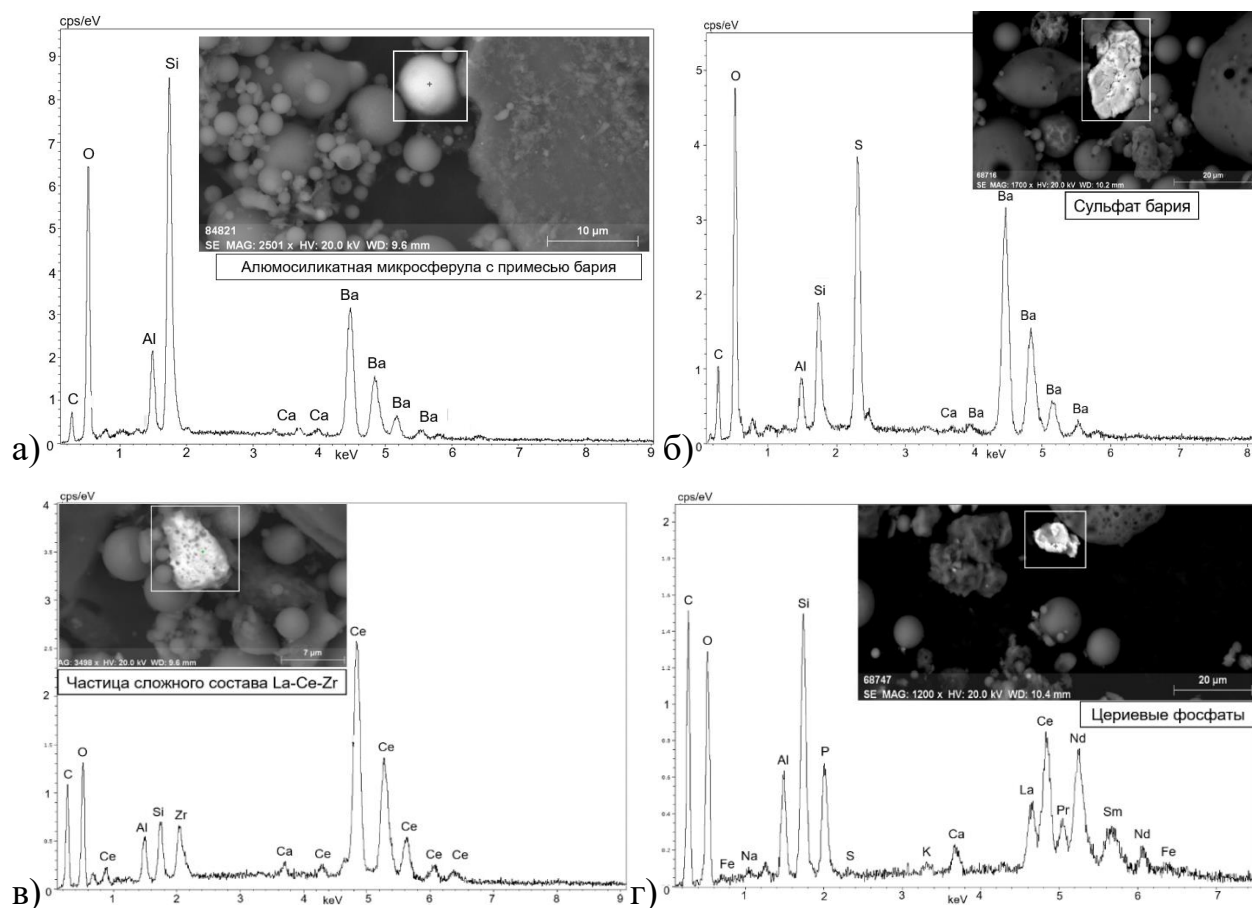


Рисунок 6.4 – Снимки и энергодисперсионные спектры микрочастиц в нерастворимой фракции снежного покрова из зоны влияния предприятий теплоэнергетики г. Кемерово: а) алюмосиликатная микросферула с примесью бария; б) сульфат бария; в) частицы сложного редкоземельного состава; г) цериевые фосфаты

Микрочастицы с барием в основном представлены сульфатами бария (в среднем масс. %: Ba – 43, S – 11, O – 29). Также встречаются алюмосиликатные микросферулы с высоким процентом бария (в среднем масс. %: Al – 18, Si – 17, Ba – 24, O – 18). Общая частота встречаемости всех барий-содержащих частиц варьируется от 0,2 до 1,3 %. Микрочастицы, содержащие редкоземельные элементы, в пробах представлены цериевыми фосфатами (в среднем масс. %: O – 36, La – 10, Ce – 23, P – 11, Al – 4, Si – 9, Nd – 9) и микрофазами сложного состава (в среднем масс. %: O – 12, La – 8, Ce – 39, Sc – 12, Al – 5, Si – 9, Zr – 8, Pr – 4, S – 4). Общая частота их встречаемости в пробах составляет менее 1 %.

Таким образом, в нерастворимой фракции снежного покрова г. Кемерово и зоны влияния предприятий угольной теплоэнергетики установлено значительное преобладание техногенных частиц над природными. Доля техногенных образований в городской черте составляет в среднем 62,2%, а вблизи промышленных объектов – 77,3%, что соответствует высокому уровню загрязнения территории. Основными техногенными образованиями индикаторами являются алюмосиликатные микросферулы ассоциированные с муллитом, угольные частицы, шлак, металлические микросферулы (ферросферулы) в пробах нерастворимой фракции снежного покрова. Содержание этих частиц превышает фоновые значения в 2-3 раза.

С увеличением расстояния от источников эмиссии наблюдается рост доли алюмосиликатных микросферул (60-85 %), муллита (13-30 %) и отношения муллит/кварц (0,4-1,8 ед.), что свидетельствует о среднем и высоком уровнях загрязнения снежного покрова. Определено уменьшение доли шлака и угольных частиц в пробах по мере удаления от предприятия. Микрочастицы-индикаторы, содержащие барий и редкоземельные элементы, выявлены в пробах преимущественно в радиусе до 1,5 км от предприятий.

Определены количественные показатели содержания индикаторных техногенных минералов и микрочастиц в нерастворимой фракции снежного покрова по мере удаления от объектов теплоэнергетики, что позволило установить дальность переноса продуктов сжигания угля.

Заключение

Данная работа позволила дать эколого-геохимическую оценку современного состояния в г. Кемерово на основе изучения состава нерастворимой фракции снежного покрова.

1. Определено, что уровень пылевой нагрузки на территорию города изменяется от 15 до 610 мг/(м²·сут.). Выявлены ореолы преимущественно со средним (60-240 мг/(м²·сут.)) и высоким (240-600 мг/(м²·сут.)) уровнями пылевой нагрузки относительно фона. Ореол с высоким уровнем пылевой нагрузки имеет расположение в северной части города под влиянием выбросов предприятий угольной теплоэнергетики и коксохимии. Средний уровень пылевой нагрузки зафиксирован на большей части территории города. А участки с низким уровнем пылевой нагрузки (20-60 мг/(м²·сут.)) приурочены к западной части (вблизи завода азотных удобрений) и южному району.

2. Эколого-геохимическое районирование территории г. Кемерово по составу нерастворимой фракции снежного покрова выявило четыре зоны с уникальными геохимическими ассоциациями, отражающими влияние функционирующих предприятий и автотранспорта. Первая зона, занимающая незначительную площадь, характеризуется минимальными относительно других зон концентрациями элементов в ассоциации Sc-Fe-Co-Rb-Sr-Cs-Ba-La-Ce-Nd-Eu-Tb-Yb-Lu-Hf-Th-U. Вторая зона, занимающая большую часть города, отличается максимальными средними концентрациями Ca, Tb, Sc, Fe, Na и минимальными концентрациями Cs, Ta, Th, Hg в пробах, вероятно, формируется за счет дальнего массопереноса вещества от промышленных предприятий. Третья зона, приуроченная к районам влияния теплоэнергетической и химической промышленности, выделяется максимальными средними концентрациями Cs, Ta, Th и низкими Ca и Hg в пробах относительно данных для второй зоны, и максимальными средними уровнями накопления большинства редкоземельных элементов (Sm, Ce, Lu, Yb, Hf, Nd, Eu, La), а также Cs и Th в пробах относительно остальных зон. Четвертая зона сформирована преимущественно автотранспортом, о чем свидетельствует ассоциация элементов Cr-Co-Zn-Br-Sb.

3. В период мониторинга (2016-2023 гг.) зоны влияния предприятий теплоэнергетики и коксохимии сохранялся высокий уровень пылевой нагрузки ($245-380 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{сут.})$) относительно фона. Концентрации элементов-индикаторов (Ca, Sc, Sr, Cs, Ba, Hf, Ta, Hg, Th, U, лантаноиды), отражающие геохимическую специфику состава нерастворимой фракции снежного покрова, превышали фоновые значения в 2-25 раз. Уровни накопления элементов-индикаторов в пробах статистически значимо коррелируют с объемами сжигаемого угля, составом угля и золы уноса. Установлена также зависимость пылевой нагрузки и содержания индикаторной группы элементов от метеопараметров в зимний сезон (относительная влажность, скорость ветра, сумма осадков).

4. В нерастворимой фракции снежного покрова на территории города над природными минеральными (в среднем 38 %) преобладают техногенные частицы (в среднем 62 %), представленные алюмосиликатными микросферулами (19 %), ферросферулами (3 %), шлаком и угольными частицами (34 %). С удалением от предприятий теплоэнергетики по основному массопереносу вещества на расстояние от 0,5 до 6 км в нерастворимой фракции снежного покрова доля муллита и алюмосиликатных микросферул, индикаторов высокотемпературного сжигания угля, возрастает в 1,5-2 раза (с 13 до 30 %; с 63 до 84 %, соответственно) и отношение муллит/кварц также увеличивается в 4,5 раза (от 0,4 до 1,8 ед.). Процент встречаемости других продуктов сжигания угля, таких как шлак и угольные частицы уменьшается в пробах с расстоянием от источников выбросов от 2,5 до 5 раз (с 16 до 2%). Частота встречаемости специфичных ферросферул в пробах не зависит от расстояния до предприятий. Микрочастицы с барием представлены в основном сульфатами бария и алюмосиликатными частицами с высоким процентом бария, а микрочастицы с редкоземельными элементами выделяются как цериевые фосфаты и микрофазы сложного состава. Микрочастицы, содержащие барий и редкоземельные элементы, преимущественно встречаются в пробах на расстоянии до 1,5 км от промышленных объектов.

В качестве рекомендаций, по результатам исследований, можно предложить на предприятиях теплоэнергетики и коксохимии обеспечить укрытие открытых

угольных складов и мест хранения промышленных отходов для минимизации вторичного пылеобразования. Увеличить площадь зеленых насаждений (особенно в виде многорядных древесно-кустарниковых полос) в качестве естественных барьеров на пути распространения аэрозольных выбросов от промышленных зон к селитебным территориям. Разработать и внедрить комплекс мероприятий по снижению выбросов от автотранспорта (развитие общественного транспорта, оптимизация дорожного движения, переход на экологически чистое топливо).

Список литературы

1. Адлер, Ю. А. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. А. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский // М.: Наука, 1976. – 140 с.
2. Акт № 05-05/21 государственной историко-культурной экспертизы г. Кемерово – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ako.ru/upload/iblockss/02c/02cd776d75ff0f91fd021fbbf689c15b.pdf> (дата обращения 10.05.2024).
3. Арбузов, С. И. Геохимия редких элементов в углях Сибири / С. И. Арбузов, В. В. Ершов. – Томск: Изд. дом «Д-Принт». – 2007. – 468 с
4. Арбузов, С. И. Формы нахождения урана в углях и торфах Северной Азии / С. И. Арбузов, С. С. Ильенок, А. В. Волостнов, С. Г. Маслов, В. С. Архипов // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 109-115.
5. Арбузов, С. И. Геохимия радиоактивных элементов: учебное пособие / С. И. Арбузов, Л. П. Рихванов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 320 с.
6. Арбузов, С. И. Металлоносность углей Сибири / С. И. Арбузов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 1. – С. 77-83.
7. Арбузов, С. И. Геохимия редких элементов в углях Центральной Сибири: дис. ... д-ра геол.-мин. наук: 25.00.09. – Томск, 2005. – 499 с.
8. Арбузов, С. И. Редкие элементы в углях Кузнецкого бассейна / С. И. Арбузов, В. В. Ершов, А. А. Поцелуев, Л. П. Рихванов. – Кемерово: Изд-во КПК, 2000. – 246 с.
9. Артамонова, С. Ю. Геохимические особенности аэрозольного загрязнения в районе Сибирского химического комбината / С. Ю. Артамонова // Химия в интересах устойчивого развития. – 2012. – Т. 20. – С. 405-418.
10. Артамонова, С. Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) / С. Ю. Артамонова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 212–223.

11. Артамонова, С. Ю. Уран и торий в аэрозольных выпадениях г. Новосибирска и его окрестностей (Западная Сибирь) / С. Ю. Артамонова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 7. – С. 212–22.
12. Архив погоды /Архив погоды в России / Архив погоды в Кемерово – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://world-weather.ru/> (дата обращения: 29.05.2024).
13. Ахметов, С. А. Технология переработки нефти, газа и твердых горючих ископаемых: учебное пособие для вузов / С. А. Ахметов, М. Х. Ишмияров, А. А. Кауфман; под ред. С. А. Ахметова. – Санкт-Петербург: Недра, 2009. – 832 с.
14. Аэрозоли в природных планшетах Сибири / А. П. Бояркина, В. В. Байковский, Н. В. Васильев [и др.]; Томский государственный университет. – Томск : Изд-во Томского государственного университета, 1993. – 157 с.
15. Баумгертнер, М. В. Экологический мониторинг ООПТ Кемеровской области методом лишеноиндикации на примере государственного заповедника «Кузнецкий Алатау» / М. В. Баумгертнер // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2011. – № 12. – С. 237–240.
16. Беляев, С. П. Некоторые закономерности загрязнения природной среды продуктами сгорания каменного угля на примере г. Кызыла / С. П. Беляев, С. П. Бесчастнов, Г. М. Хомушку, Т. И. Моршина, А. И. Шилина // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 12. – С. 54–63
17. Бортникова, С. Б. Методы анализа данных загрязнения снегового покрова в зонах влияния промышленных предприятий (на примере г. Новосибирск) / С. Б. Бортникова, В. Ф. Рапута, А. Ю. Девятова, Ф. Н. Юдахин // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2009. – № 6. – С. 515–525.
18. Василенко, В. Н. Мониторинг загрязнения снежного покрова / В. Н. Василенко, И. М. Назаров, Ш. Д. Фридман. – Л.: Гидрометиздат, 1985. – 181 с.
19. Володина, Д. А. Влияние цементных заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий на основе изучения снегового покрова:

автореф. дисс. ... канд. геол.-минерал. наук: спец. 1.6.21 / Володина Дарья Анатольевна. – Томск, 2024. – 22 с.

20. Волох, А. А. Опыт контроля за загрязнением атмосферного воздуха металлами и летучими органическими соединениями на городских и фоновых территориях / А. А. Волох. // Геохимические исследования городских агломераций. – М.: ИМГРЭ, 1998. – С. 40–58.

21. Воронцова, А. В. Особенности поведения поллютантов в снеговом покрове Санкт-Петербурга и их влияние на городскую среду: автореф. дис... канд. геогр. наук.: 25.00.36 / Воронцова Анна Владиславовна. – СПб., 2013. – 23 с.

22. Геологическое строение. Рельеф Кемеровской области / liveinternet – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.liveinternet.ru/community/2412886/post70932486/> (дата обращения: 25.03.2019).

23. Геохимия окружающей среды / Ю. Е. Саэт, Б. А. Ревич, Е. П. Янин и др. – М.: Изд-во «Недра», 1990. – 335 с

24. Глазунов, В. Г. Анализ перспектив моделирования мезоклиматических различий мегаполиса и окружающей местности / В. Г. Глазунов. // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2000. – № 6. – С. 19–24.

25. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200 000 [Карта]: геологическая карта и полезные ископаемые неоген-четвертичных образований. Кузбасская серия / ред. А. Э. Изох ; сост. ФГУГП «Запсибгеолсъемка». – 2-е изд. – Кемерово, 2001. – 1 к. (2 л.).

26. Григоренко, А. В. Влияние предприятия теплоэнергетики на селитебную территорию г. Минусинска / А. В. Григоренко // Экологические проблемы промышленных городов: сборник статей. – Саратов, 2013. – С. 174-176.

27. Григорьев, Н. А. Среднее содержание химических элементов в горных породах, слагающих нижнюю часть континентальной коры / Н. А. Григорьев // Геохимия. – 2003. – № 7. – С. 785–792.

28. Гришанцева, Е. С. Влияние атмосферных выбросов Конаковской ГРЭС на состояние снегового покрова района Ивановского водохранилища / Е. С.

Гришанцева, Н. С. Сафронова, Н. В. Кирпичникова // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2012. – № 2. – С. 135–142.

29. Девятова, А. Ю. Тяжелые металлы в депонирующих средах и прогнозная модель переноса примесей от стационарных техногенных источников: на примере г. Новосибирска: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Девятова Анна Юрьевна. – Томск, 2006. – 150 с.

30. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2016 году. – Кемерово, 2017. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2018/12/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B42016-11.pdf> (дата обращения 10.05.2024).

31. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2020 году. – Кемерово, 2021. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2021/09/%D0%94%D0%9E%D0%9A%D0%9B%D0%90%D0%94-2020-%D0%BD%D0%B0-01.07.2021_1-1.pdf (дата обращения 10.05.2024).

32. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2022 году. – Кемерово, 2023. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2023/11/Doklad_zh_2022_01_07_2023_04.pdf (дата обращения 10.05.2024).

33. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области в 2023 году. – Кемерово, 2024. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://kuzbasseco.ru/wp-content/uploads/2025/02/DOKLAD_2023.pdf (дата обращения 10.05.2024).

34. Дудкина, О. А. Канцерогены производственной среды и онкологическая заболеваемость на углеперерабатывающих производствах Кузбасса / О. А. Дудкина, В. И. Минина, С. А. Ларин, С. А. Мун, А. Н. Глушков // Политравма. – 2011. – № 1. – С. 82-103

35. Еремина, И. Д. Кислотность и химический состав снежного покрова в Москве и Подмоскowie за период 1999–2006 гг. / И. Д. Еремина, А. В. Григорьев // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2010. – № 3. – С. 55–60.

36. Жорняк, Л. В. Эколого-геохимическая оценка территории г. Томска по данным изучения почв: автореф. дис.: ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Жорняк Лина Владимировна. – Томск, 2009. – 24 с.

37. Журавлев, Н. М. Оценка влияния предприятий Сибири и Дальнего Востока на окружающую среду / Н. М. Журавлев, И. К. Клем-Мусатова, В. Н. Чурашев // Регион: Экономика и социология. – 2002. – № 4. – С. 88–102.

38. Журавлева, Н.В. Загрязнение снегового покрова полициклическими ароматическими углеводородами и токсичными элементами на примере г. Новокузнецка / Н.В. Журавлева, Р.Р. Потокина, З.Р. Исмагилов, Е.Р. Хабибулина // Химия в интересах устойчивого развития. – 2014. – Т. 22. – № 5. – С. 445–454.

39. Зарина, Л. М. Геоэкологические особенности распределения тяжелых металлов в снежном покрове Санкт-Петербургского региона: автореф. дис... канд. геогр. наук.: 25.00.36 / Зарина Лариса Михайловна. – СПб., 2009. – 22 с.

40. Захарченко, А. В. Кластерный анализ стандартизованных значений содержания микроэлементов твердой фазы снега городов Тобольск и Тюмень / А. В. Захарченко, А. А. Тигеев, О. А. Пасько, Д. В. Московченко // Экология и промышленность России. – 2023. – Т. 27. № 4. – С. 61–65. – DOI: 10.18412/1816-0395-2023-4-61-65.

41. Зубицкий, Б. Д. Защита атмосферы при модернизации коксохимического завода / Б. Д. Зубицкий, В. Б. Ляпип, А. И. Гаус, В. Г. Назаров // Кокс и химия. – 1997. – № 4. – С. 37–39.

42. Зубицкий, Б. Д. Обоснование и разработка технологических процессов модернизации коксохимического производства в сложных экологических условиях (на примере ОАО «Кокс»): автореф. дисс. ... канд. техн. наук. / Зубицкий Борис Давыдович. – Красноярск, 2000. – 22 с.

43. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства

энергии»: ИТС 38-2022 / Федер. гос. бюджет. учреждение «Федер. центр нормирования, охраны окружающей среды и оценки воздействия на окружающую среду» (ФГБУ «ФЦНО»). – Москва: ФГБУ «ФЦНО», 2022. – 330.

44. Казакова, О. А. Состав неорганической части угля Таловского месторождения Томской области / О. А. Казакова, А. С. Заворин, А. В. Казаков // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. № 4: Энергетика. – С. 49-52.

45. Какарека, С. В. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: опыт оценки удельных показателей / С. В. Какарека, В. С. Хомич, Т. И. Кухарчик [и др.] ; Институт геологических наук Национальной академии наук Беларуси. – Минск : ИГН НАН Беларуси, 1998. – 156 с.

46. Касимов, Н. С. Геоинформационное ландшафтно-геохимическое картографирование городских территорий (на примере ВАО Москвы). Картографическое обеспечение / Н. С. Касимов, Е. М. Никифорова, Н. Е. Кошелева, Т. С. Хайбрахманов // Геоинформатика. – 2012. – № 4. – С. 37-45

47. Касимов, Н. С. Геохимия ландшафтов Восточной Москвы / Н. С. Касимов, Д. В. Власов, Н. Е. Кошелева, Е. М. Никифорова. – М.: АПР, 2016. – 276 с.

48. Касимов, Н. С. Кларки химических элементов как эталоны сравнения в экогеохимии / Н. С. Касимов, Д. В. Власов // Вестник МГУ. Сер. 5. География. – 2015. – № 2. – С. 7-17.

49. Касимов, Н. С. Методология и методика ландшафтно-геохимического анализа городов / Н. С. Касимов // Экогеохимия городских ландшафтов / под общ. ред. Н. С. Касимова. – Москва: Изд-во МГУ, 1995. – С. 6–39.

50. Каталог электростанций / energybase.ru/ – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://energybase.ru/power-plant> (дата обращения: 29.05.2024)

51. Кемеровская область на карте России / Карта России – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://planetolog.ru/map-rus-oblastzoom.php?oblast=KEM&type=1> (дата обращения: 23.09.2020)

52. Кемеровский городской совет / Анализ и оценка экологической ситуации в городе Кемерово – [Электронный ресурс] – Режим доступа:

http://kemgorsovet.ru/pravovyye-aktyi/zasedaniya-gorodskogo-soveta/arxiv/2007/archive_2007_995/archive_2007_996/archive_2007_997/archive_2007_1007.html (дата обращения: 11.04.2023).

53. Кемеровский механический завод – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://xn--80aegj1b5e.xn--p1ai/factory/kmz-5> (дата обращения: 29.05.2024)

54. Кирина В. Д. Геохимия твердой фазы снежного покрова в зоне влияния ГРЭС г. Кемерово / В. Д. Кирина; науч. рук. А. В. Таловская // Проблемы геологии и освоения недр : труды XXIII Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня рождения академика К. И. Сатпаева, 120-летию со дня рождения профессора К. В. Радугина, Томск, 8-12 апреля 2019 г. : в 2 т. – Томск : Изд-во ТПУ, 2019. – Т. 1. – [С. 582-583].

55. Куимова, Н. Г. Эколого-геохимическая оценка аэротехногенного загрязнения урбанизированных территорий по состоянию снежного покрова / Н. Г. Куимова, А. Г. Сергеева, Л. П. Шумилова и др. // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2012. – № 5. – С. 422–435.

56. Ларин, С. А. Комплексное воздействие техногенного загрязнения среды обитания на развитие онкопатологии у населения в регионе с развитой угледобывающей и углеперерабатывающей промышленностью: автореферат дис. ... д-ра биол. наук: 03.02.08 / Ларин Сергей Анатольевич. – Томск, 2013. – 44 с.

57. Ларин, С. А. Заболеваемость населения Кемеровской области раком лёгкого и раком желудка с 1996 г. по 2015 г. / С. А. Ларин, С. А. Мун, В. В. Браиловский, Ю. А. Магарилл, А. Н. Попов, Н. А. Ерёмина // Фундаментальная и клиническая медицина. – 2017. – № 2 (2). – С. 43–51.

58. Леженин, А. А. Мониторинг аэрозольного загрязнения снежного покрова на основе наземной и спутниковой информации / А. А. Леженин, Т. В. Ярославцева, В. Ф. Рапута // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – № 9 (7). – С. 950–959.

59. Литау, В. В. Эколого-геохимическая оценка территории в зоне влияния разнопрофильных промышленных объектов по данным изучения снегового покрова (на примере Октябрьского промузла г. Омска) / В. В. Литау, А. В.

Таловская, М. И. Третьякова, А. Д. Лончакова // Вопросы естествознания. – 2015. – № 3 (7). – С. 102-107.

60. Маркова, Ю. Л. Оценка воздействия промышленности и транспорта на экосистему национального парка «Лосиный остров»: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук: 25.00.09 / Маркова Юлия Леонидовна. – Москва, 2003. – 24 с.

61. Методические рекомендации по геохимической оценке загрязнения территории городов химическими элементами / Б. А. Ревич, Ю. И. Саэт, Р. С. Смирнова, Е. П. Сорокина. – М.: ИМГРЭ, 1982. – 111 с.

62. Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве / Б. А. Ревич, Ю. Е. Саэт, Р. С. Смирнова. – М.: ИМГРЭ, 2006. – 7 с.

63. Микушин, В. В. Оценка аэрозольного загрязнения атмосферы заселенных пунктов Алтайского края и Республики Алтай по данным мониторинга снежного покрова / В. В. Микушин, А. Е. Каплинский, И. А. Суторихин [и др.] // Экология урбанизированных территорий. – 2006. – № 2. – С. 87–93.

64. Михальчук, А. А. Многомерный статистический анализ эколого-геохимических измерений. Часть II. Компьютерный практикум: учебное пособие / А. А. Михальчук, Е. Г. Языков. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 152 с

65. Московченко, Д. В. Геохимическая характеристика снежного покрова г. Тобольск / Д. В. Московченко, Р. Ю. Пожитков, А. В. Соромотин / Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 5. – С. 156-169.

66. Московченко, Д. В. Нефтегазодобыча и окружающая среда: эколого-геохимический анализ Тюменской области / Д. В. Московченко. – Новосибирск: Наука, Сиб. предприятие РАН, 1998. – 112 с.

67. Московченко, Д. В. Особенности формирования химического состава снеговых вод на территории Ханты-Мансийского автономного округа / Д. В.

Московченко, А. Г. Бабушкин // Криосфера Земли. – 2012. – Т. 16. – № 1. – С. 71–81.

68. Назаров, И. М. Использование сетевых снегосъемок для изучения загрязнения снежного покрова / И. М. Назаров, Ш. Д. Фридман, О. С. Ренне // Метеорология и гидрология. – 1978. – № 7. – С. 74–78.

69. Назаров, И. М. Снежный покров как индикатор загрязнения атмосферы / И. М. Назаров, О. С. Ренне, Ш. Д. Фридман, Л. Г. Шаповалов, Э. П. Махонько // Труды Института физики и математики АН Литовской ССР. – 1976. – № 3. – С. 7–12.

70. Некипелый, В. Л. Геолого-экологическая карта города Новокузнецка и пригородной зоны: отчет по геолого-экологическим исследованиям города Новокузнецка и пригородной зоны, проведенным в 1993–96 гг. / В. Л. Некипелый, Н. И. Немтина, С. А. Некипелая. – Новокузнецк: Изд-во ТОО «Кузбассэкогеоцентр», 1998. – Т. 2. – 557 с.

71. Новороцкая, А. Г. Химический состав снежного покрова как индикатор экологического состояния Нижнего Приамурья: автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Новороцкая Александра Григорьевна. – Хабаровск, 2002. – 23 с.

72. Новостной сайт г. Кемерово (VSE42.RU), Кемерово, 2025. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://vse42.ru/> (дата обращения 24.05.2024).

73. О санитарно-эпидемиологической обстановке в Российской Федерации в 1998 году: государственный доклад / Министерство здравоохранения Российской Федерации. – Москва, 1999. – 188 с.

74. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году: государственный доклад / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. – Москва: 2023. – 500 с.

75. Оболкин, В. А. Элементный состав нерастворимой фракции атмосферных выпадений в некоторых районах Южного Прибайкалья / В. А. Оболкин, Н. А. Кобелева, Т. В. Ходжер и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 5-6. – С. 414–417

76. Общая характеристика г. Кемерово / Администрация города Кемерово – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://kemerovo.ru/gorod/obshchaya-informatsiya/obshchaya-kharakteristika-g-kemerovo/> (дата обращения: 29.05.2024)

77. Онищук, Н. А. Особенности современного режима снежного покрова и химический состав атмосферных осадков в южной части Иркутской области: автореф. дис. ... канд. географ. наук: 25.00.30 / Онищук Наталья Анатольевна. – Казань, 2010. – 23 с.

78. Опекунов, А. Ю. Минералого-геохимические особенности снежного покрова на антропогенно нарушенных территориях Надым-Пуровского междуречья (север Западной Сибири) / А. Ю. Опекунов, М. Г. Опекунова, С. Ю. Кукушкин, С. Ю. Янсон // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2024. – № 3. – С. 17–31. – DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.3.2.

79. Осипова, Н. А. Содержание токсичных элементов в уличной пыли и оценка риска для здоровья человека (Междуреченск, Южный Кузбасс) / Н. А. Осипова, К. Ю. Осипов, А. В. Таловская [и др.] // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. № 3. – [С. 229-244].

80. Основы современной энергетики: в 2-х тт. / под общ. ред. чл.-корр. РАН Е.В. Аметистова. – 5-е изд., стер.. – Москва: Изд-во МЭИ, 2010. – 472 с.

81. Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году / Системный оператор Единой энергетической системы; АО «СО ЕЭС». – Москва: АО «СО ЕЭС», 2024. – 4 с.

82. Павлов, В. Е. Мезомасштабный характер распространенности ряда химических элементов в аэрозоле, загрязняющем снежный покров городов Кемеровской области / В. Е. Павлов, И. А. Суторихин, И. В. Хвостов // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. № 1. – С. 96–97.

83. Павлов, В. Е. Результаты статистической обработки данных химического состава вод рек Южного Прибайкалья / В. Е. Павлов, Л. М. Сороковикова, И. В. Томберг, И. В. Хвостов // Оптика атмосферы и океана. – 2013. – Т. 26. № 4. – С. 297–299.

84. Пат. 2229737 Россия, МПК7 G 01 V 9/00. Способ определения загрязненности снегового покрова радиоактивными компонентами / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, А. Ф. Судыко Е. А. Филимоненко; заявитель и патентообладатель: Томский политехнический университет. – №2011100193/28; заявл. 11.01.2011; опубл. 20.06.2012.

85. Петренко, И. Е. Итоги работы угольной промышленности России за январь–июнь 2022 года / И. Е. Петренко // Уголь. – 2022. – № 9. – С. 7–22. – DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-7-22>.

86. ПНД Ф 16.1:2.23-2000. Методика выполнения измерений массовой доли общей ртути в пробах почв и грунтов на анализаторе ртути РА-915+ с приставкой РП-91С, 2000. – 56 с.

87. Пожитков, Р. Ю. Экогеохимия атмосферных выпадений на территории городских агломераций и месторождений углеводородов тюменской области (по данным изучения состава снегового покрова и верхового торфа): автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук : спец. 1.6.21 / Р. Ю. Пожитков; Национальный исследовательский Томский государственный университет ; науч. рук. Д. В. Московченко. – Томск, 2024.

88. Попов, Ю. П. Радиоактивное загрязнение снеговых выпадений в зоне влияния ТЭЦ / Ю. П. Попов // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы. III Международной конференции. – Томск: Изд-во STT, 2009. – С. 471–474.

89. Предприятие – производитель ООО «Химпром» / Extream – [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://extream.ru/Predpriyatie__proizvoditel__O_KOMPANII_10.htm (дата обращения: 29.05.2024)

90. Проблемы оценок и управления экологическими рисками на предприятиях ТЭК / А. П. Хаустов, М. М. Редина, П. Недоступ, А. Силаев // Энергобезопасность в документах и фактах. – 2005. – № 6. – С. 25-30.

91. Проект нормативов предельно допустимых выбросов в атмосферу для Кемеровской ГРЭС / АО «Кемеровская генерация». – Кемерово, 2018. – 255 с.

92. Просяникова, О. И. Антропогенная трансформация почв Кемеровской области: монография / О. И. Просяникова. – Кемерово: ИИО Кемеровский ГСХИ, 2005. – 300 с.

93. Рапута, В. Ф. Анализ данных наблюдений аэрозольного загрязнения снегового покрова в окрестностях Томска и Северска / В. Ф. Рапута, А. В. Таловская, В. В. Коковкин, Е. Г. Язиков // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – №. 1. – С. 74–78.

94. Рапута, В. Ф. Методы численного анализа данных наблюдений регионального загрязнения территорий площадным источником / В. Ф. Рапута, С. Е. Олькин, И. К. Резникова // Оптика атмосферы и океана. – 2008. – Т. 21. – №. 6. – С. 558–562.

95. Рапута, В. Ф. Наземный и спутниковый мониторинг загрязнения снежного покрова города в оценке состояния здоровья населения / В. Ф. Рапута, Т. В. Ярославцева // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 4. – № 1. – С. 32–36.

96. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2022 года N 4260-р «Об утверждении Стратегии развития металлургической промышленности Российской Федерации до 2030 года».

97. Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 N 1523-р (ред. от 15.02.2025) «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».

98. Рихванов, Л. П. Предварительные данные о геохимических особенностях ледниковых образований (на примере ледника Большой Актру в Горном Алтае) / Л. П. Рихванов, Ю. В. Робертус, А. В. Таловская, А. Ю. Шатилов // Тяжелые металлы и радионуклиды в окружающей среде: Материалы Международной конференции. – Семипалатинск, 2006. – Т. 2. – С. 388–395.

99. Роговенко, Е. С. Экологический контроль антропогенного загрязнения снегового покрова одного из промышленных районов г. Красноярск / Е. С. Роговенко, Н. В. Блинникова, А. А. Шубин, Л. Г. Бондарева // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2010. – Т. 3. – № 4. – С. 387–394.

100. Романова, Е. В. Лишайники-биоиндикаторы атмосферного загрязнения г. Кемерово / Е. В. Романова // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2012. – № 4 (20). – С. 203–214.
101. Рудыка, В. И. Защита окружающей среды: основные мероприятия и их эффективность / В. И. Рудыка, Т. Ф. Трембач, В. Б. Каменюка // Кокс и химия. – 2003. – № 12. – С. 34–35.
102. Рыжкин В. Я. Тепловые электрические станции. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
103. Савичев, О. Г. Атмосферные выпадения в бассейне средней Оби и их влияние на гидрохимический сток рек / О. Г. Савичев, А. О. Иванов // Известия РАН. Серия географическая. – 2010. – № 1. – С. 63–70.
104. Сает, Ю. Е. Руководство по контролю загрязнения атмосферы / Ю. Е. Сает. – М.: Метеоагентство Росгидромета, 1991. – 860 с. – (РД 52.04.186-89).
105. СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2)
106. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий».
107. Свистов, П. Ф. Антропогенные осадки: происхождение, состав и свойства / П. Ф. Свистов // Экологическая химия. – 2011. – Т. 20. – № 2. – С. 105–113.
108. Сергеева, А. Г. Снежный покров как индикатор состояния атмосферного воздуха в системе санитарно-экологического мониторинга / А. Г. Сергеева, Н. Г. Куимова // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. – 2011. – № 40. – С. 100–104.
109. Систер, В. Г. Инженерно-экологическая защита водной системы северного мегаполиса в зимний период / В. Г. Систер, В. Е. Корецкий. – М.: Центр МГУИЭ, 2004. – 159 с.

110. Скворцов, В. А. Твердые фазы аэрозолей в природно-технических системах городов Прибайкалья / В. А. Скворцов, Н. В. Федорова, В. П. Рогова и др. // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. – 2011. – № 1. – С. 31–39.

111. Скрипко, Т. В. Влияние выбросов предприятий промышленного мегаполиса на состояние снежного покрова / Т. В. Скрипко, А. В. Елисеева // Омский научный вестник. – 2013. – № 2(124). – С. 110–113.

112. Справочник коксохимика: в 3 т. / под ред. П. А. Юдина. – Москва: Металлургия, 1982. – Т. 1.: Технология коксохимического производства / Р. Е. Лейбович, Е. И. Яковлева, А. Б. Филатова. – 360 с.

113. Судыко, А. Ф. Определение урана, тория, скандия и некоторых редкоземельных элементов в двадцати четырех стандартных образцах сравнения инструментальным нейтронноактивационным методом / А. Ф. Судыко // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Материалы V Международной конференции. – Томск: STT, 2016. – С. 620–625.

114. Схема теплоснабжения города Кемерово на период до 2033 года (актуализация на 2022 год): обосновывающие материалы. Кн. 9: Перспективные топливные балансы / Администрация г. Кемерово – Кемерово, 2023. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kemerovo.ru/filedownload.php?file=3439> (дата обращения: 17.10.2024).

115. Сычева, Д. Г. Тяжелые металлы и металлоиды в почвах и дорожной пыли городов Бурятии в зоне влияния угольных ТЭС: источники загрязнения, фракционирование и экологический риск: дис. ... к-та геогр. наук: 1.6.22 / Сычева Дарья Геннадьевна. – Москва, 2025. – 188 с.

116. Таловская, А. В. Динамика элементного состава снегового покрова на территории северо-восточной зоны влияния Томск-Северской промышленной агломерации / А. В. Таловская, Е. А. Филимоненко, Е. Г. Язиков // Оптика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 27. – № 6. – С. 491–495.

117. Таловская, А. В. Оценка загрязнения атмосферного воздуха урбанизированных районов Томской области по данным изучения снегового

покрова / А. В. Таловская, Е. Г. Язиков, Е. А. Филимоненко // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2014. – № 5. – С. 408–417.

118. Таловская, А. В. Оценка эколого-геохимического состояния районов г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Таловская Анна Валерьевна. – Томск, 2008. – 185 с.

119. Таловская, А. В. Экогеохимия атмосферных аэрозолей на урбанизированных территориях юга Сибири (по данным изучения состава нерастворимого осадка снегового покрова): дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 1.6.21 / Таловская Анна Валерьевна. – Томск, 2022. – 373 с.

120. Темиржанова, А. Е. Элементный состав твердой фазы снегового покрова малых населенных пунктов (на примере села Долонь Восточно-Казахстанской области, Республика Казахстан) / А. Е. Темиржанова, М. Т. Дюсембаева, С. Н. Лукашенко, Е. Г. Язиков, Е. З. Шакенов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 12. – С. 41-50.

121. Удачин, В. Н. Экогеохимия горнопромышленного техногенеза Южного Урала: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.09 / Удачин Валерий Николаевич. – Миасс, 2012. – 352 с.

122. Филимоненко, Е. А. Эколого-геохимическая обстановка в районах расположения объектов теплоэнергетики по данным изучения нерастворимой и растворимой фаз снега (на примере Томской области): дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Филимоненко Екатерина Анатольевна. – Томск, 2015. – 152 с.

123. Филимонова, Л. М. Исследование геоэкологических особенностей снегового покрова в зоне влияния алюминиевого завода с использованием метода физико-химического моделирования: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Филимонова Людмила Михайловна. – Иркутск, 2017. – 134 с.

124. Хайрулин, С. Р. Методы очистки коксового газа от сероводорода. Процессы утилизации H_2S . Сорбционные процессы (обзор). Часть 1 / С. Р. Хайрулин, В. В. Кузнецов, Р. А. Батуев, Т. Н. Теряева, Б. Г. Трясунов, Р. Г. Гарифуллин, С. Н. Филимонов, А. В. Сальников, З. Р. Исмагилов // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 3 (143). – С. 60–80.

125. Харлампович, Г. Д. Технология коксохимического производства: учебник для вузов / Г. Д. Харлампович, А. А. Кауфман. – Москва: Металлургия, 1995. – 384 с.

126. Чудинова, О. Н. Оценка загрязнения атмосферного воздуха продуктами сгорания угля и мазута на примере квартальных котельных г. Улан-Удэ / О. Н. Чудинова, Т. В. Чередова, А. А. Бутакова, А. П. Беспрозванных // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2024. – Т. 32. – № 2. – С. 184-197. – DOI: 10.22363/2313-2310-2024-32-2-184-197.

127. Чудинова, О. Н. Оценка загрязнения снегового покрова в зоне воздействия объектов теплоэнергетики/ О. Н. Чудинова, С. Б. Норбоева // Известия БГУ. – 2023. – № 1. – С. 121–129. DOI: 10.17150/2500-2759.2023.33(1).121-129.

128. Шакирова, А. Р. Геоэкологический анализ урбанизированных территорий: на примере г. Томска: дис. ... канд. геогр. наук: 25.00.36 / Шакирова Альбина Равильевна. – Томск, 2007. – 24 с.

129. Шатилов, А. Ю. Вещественный состав и геохимическая характеристика атмосферных выпадений на территории Обского бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Шатилов Алексей Юрьевич. – Томск, 2001. – 24 с

130. Шахова, Т. С. Влияние нефтеперерабатывающих заводов на эколого-геохимическую обстановку прилегающих территорий по данным изучения снегового покрова (на примере гг. Омск, Ачинск, Павлодар): дис. ... канд. геол.-минерал. наук 25.00.36 / Шахова Татьяна Сергеевна. – Томск, 2018. – 192 с

131. Шевченко, В. П. Влияние аэрозолей на среду и морское осадконакопление в Арктике / Шевченко В. П. – М.: Наука, 2006. – 226 с.

132. Шевченко, В. П. Исследование нерастворимых частиц в снежном покрове Западной Сибири на профиле от Томска до эстуария Оби / В. П. Шевченко, С. Н. Воробьев, С. Н. Кирпотин, И. В. Крицков, Р. М. Манасыпов, О. С. Покровский, Н. В. Политова // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28. – № 06. – С. 499–504.

133. Шестаков, Ю. Г. Математические методы в геологии / Ю. Г. Шестаков. – Красноярск: изд-во Красноярского университета, 1988. – 208 с.
134. Шульгин, Н. В. Мониторинг почв Кемеровской области на содержание мышьяка / Н. В. Шульгин, С. В. Свиркова, М. П. Ефременко, А. В. Заушинцева, О. А. Шульгина // Успехи современного естествознания. – 2017. – № 6. – С. 113–117.
135. Эколого-гигиенические проблемы городов с развитой химической промышленностью / А. П. Михайлуц, В. Н. Зайцев, С. В. Иванов, Б. Д. Зубицкий. – Новосибирск: ЦЭРИС, 1997. – 191 с.
136. Энциклопедия современной промышленности России – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.wiki-prom.ru/177/koksohimicheskie-zavody.html> (дата обращения: 21.05.2024).
137. Юдович, Я. Э. Ртуть в углях – серьезная экологическая проблема / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис // Биосфера. – 2009. – Т. 1. – № 2. – С. 237–247.
138. Юдович, Я. Э. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях / Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 648 с.
139. Юсупов, Д. В. Бром в листьях тополя урбанизированных территорий: природные и антропогенные источники поступления / Д. В. Юсупов, А. В. Таловская, Е. Г. Язиков [и др.] // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 1. – С. 76–87. – DOI: 10.18799/2225-3196/2021/1/3109.
140. Юсупов, Д. В. Методология биогеохимической индикации урбанизированных и горнопромышленных территорий на основе анализа древесной растительности: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Юсупов Дмитрий Валерьевич. – Томск, 2022. – 344 с.
141. Юсупов, Д. В. Минеральный и геохимический состав твердого осадка в снеговом покрове г. Благовещенск (Амурская область) / Д. В. Юсупов, В. А. Степанов, Н. В. Трутнева и др. // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 1. – С. 184–189.

142. Язиков, Е. Г. Минералогия техногенных образований: учебное пособие / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Л. В. Жорняк. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2011. – 160 с

143. Язиков, Е. Г. Оценка эколого-геохимического состояния территории г. Томска по данным изучения пылеаэрозолей и почв / Е. Г. Язиков, А. В. Таловская, Л. В. Жорняк. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2010. – 264 с.

144. Язиков, Е. Г. Экогеохимия урбанизированных территорий юга Западной Сибири: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук: 25.00.36 / Язиков Егор Григорьевич. – Томск, 2006. – 423 с.

145. Яковлев, Ю. В. О формах нахождения химических элементов в атмосфере: распределение микроэлементов между парами атмосферной влаги и аэрозолем в приземных слоях воздуха / Ю. В. Яковлев, А. З. Миклишанский, Б. В. Савельев // Геохимия. – 1978. – № 1. – С. 3–10.

146. Янин, Е. П. Ртуть в окружающей среде промышленного города / Е. П. Янин. – М.: ИМГРЭ, 1992. – 169 с.

147. Янин, Е. П. Эмиссия ртути в атмосферу при производстве цемента в России / Е. П. Янин – М.: ИМГРЭ, 2004. – 20 с.

148. Янченко, Н. И. Распределение некоторых элементов в снежном покрове в г. Братске / Н. И. Янченко, А.Н. Баранов, Е. П. Чебыкин, В. А. Ершов, Е. Н. Воднева // Системы. Методы. Технологии. – 2013. – № 4. – С. 164–169.

149. Arbuzov, S. I. Geochemistry, mineralogy and genesis of rare metal (Nb-Ta-Zr-Hf-Y-REE-Ga) coals of the seam XI in the south of Kuznetsk Basin, Russia / S. I. Arbuzov [et al.] // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 113. – Article 103073. – DOI: 10.1016/j.oregeorev.2019.103073

150. Astray, B. Measuring Pb isotope ratios in fresh snow filtrate refines the apportioning of contaminant sources in the Arctic / B. Astray, A. Šípková, D. Baragaño, J. Pechar, R. Krejci, M. Komárek, V. Chrastný // Environmental Pollution. – 2024. – Vol. 345. – Article 123457. – DOI: 10.1016/j.envpol.2024.123457.

151. Baig, K. S. Coal fired power plants: emission problems and controlling techniques / K. S. Baig, M. Yousaf // *Journal of Earth Science & Climatic Change*. – 2017. – Vol. 8. – No. 1. – Article 1000404. – DOI: 10.4172/2157-7617.1000404.

152. Begak, O. Y. Analysis of impurities in mixtures of West–Siberian crude oils / O. Y. Begak, A. M. Syroezhko // *Russian Journal of Applied Chemistry*. – 2001. – Vol. 74. – No. 8. – P. 1230–1234. – DOI: 10.1023/A:1013056010056.

153. Block, C. Concentration–data of elements in liquid fuel oils as obtained by neutron activation analysis / C. Block, R. Dams // *Journal of Radioanalytical Chemistry*. – 1978. – Vol. 46. – P. 137–144.

154. Csavina, J. A Review on the Importance of Metals and Metalloids in Atmospheric Dust and Aerosol from Mining Operations / J. Csavina, J. Field, M. Taylor, S. Gao, A. Landázuri, E. Betterton, A. Sącz // *Science of The Total Environment*. – 2012. – Vol. 433. – P. 58–73. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.013.

155. Czech, T. Heavy metals partitioning in fly ashes between various stages of electrostatic precipitator after combustion of different types of coal / T. Czech, A. Marchewicz, A. T. Sobczyk, A. Krupa, A. Jaworek, L. Sliwinski, D. Rosiak // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2019. – Vol. 133. – P. 236–247. – DOI: 10.1016/j.psep.2019.10.033.

156. Dong, Z. Aeolian dust transport, cycle and influences in high-elevation cryosphere of the Tibetan Plateau region: new evidences from alpine snow and ice / Z. Dong, J. Brahney, S. Kang, J. Elser, T. Wei, X. Jiao, Y. Shao // *Earth-Science Reviews*. – 2020. – Vol. 211. – Article 103408. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103408.

157. EIA 2023. BP Statistical Review of World Energy 2023. – BP p.l.c., 2023. – 66 p.

158. European Commission. Best Available Techniques (BAT). Reference Document for the Production of Iron and Steel – Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. – 627 p.

159. Garcia, E. Systematic characterization of selenium speciation in coal fly ash / E. Garcia, P. Liu, S. E. Bone, Y. Wen, Y. Tang // *Environmental Science: Processes & Impacts*. – 2024. – Vol. 26. – No. 12. – P. 2240–2249. – DOI: 10.1039/d4em00398e.

160. Ge, X. H. Greenhouse gas emissions by the Chinese coking industry / X. H. Ge, L. P. Chang, J. Yuan, J. C. Ma, X. D. Su, H. J. Ji // *Polish Journal of Environmental Studies*. – 2016. – Vol. 25. – No. 2. – P. 593–598. – DOI: 10.15244/pjoes/61153.

161. Global Coal and Coke Market Trends [Electronic resource] / McKinsey & Company. – 2022. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights> (дата обращения: 21.05.2024).

162. Global Energy Monitor (2023) / Global Coal Plant Tracker. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-coal-plant-tracker/> (дата обращения: 15.10.2023).

163. Gogoi, M. Response of ambient BC concentration across the Indian region to the nation-wide lockdown: results from the ARFINET measurements of ISRO-GBP / M. Gogoi, S. Babu, Arun B. S., K. K. Moorthy, A. Aravindakshan, A. Parottil, A. Suryavanshi, A. Borgohain, A. Guha, A. Shaikh, B. Pathak, B. Gharai, Boopathy R., B. Gugamsetty, H. Menon, J. C. Kuniyal, R. M. Jayabalakrishnan, K. Gopal, M. Maheswari, Y. Kant // *Current Science*. – 2021. – Vol. 120. – No. 2. – P. 341–351. – DOI: 10.18520/cs/v120/i2/341-351.

164. Grahame, T. Health effects of airborne particulate matter: Do we know enough to consider regulating specific particle types or sources? / T. Grahame, R. Schlesinger // *Inhalation Toxicology*. – 2007. – Vol. 19. – No. 6–7. – P. 457–481. – DOI: 10.1080/08958370701353036.

165. Gune, M. M. Occurrence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air and soil surrounding a coal-fired thermal power plant in the south-west coast of India / M. M. Gune, W. L. Ma, S. Sampath, W. Li, Y. F. Li, H. N. Udayashankar, K. Balakrishna, Z. Zhang // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2019. – Vol. 26. – No. 22. – P. 22772–22782. – DOI: 10.1007/s11356-019-05380-y.

166. Guo, Y. The evolution of China's provincial shared producer and consumer responsibilities for energy-related mercury emissions / Y. Guo, B. Chen, J. Li, Q. Yang, Z. Wu, X. Tang // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 245. – Article 118678. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118678.

167. He, Q. S. Composition patterns, emission factors and preliminary emission estimation of particulates and volatile organic compounds from coking processes in China / Q. S. He. – Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006. – 150 p.

168. IEA (2023). Coal 2023: Analysis and forecast to 2026 [Electronic resource] / International Energy Agency (IEA). – Paris: IEA Publications, 2023. – 130 p. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.iea.org/reports/coal-2023> (дата обращения: 15.10.2024).

169. Ige, O. A regional study to evaluate the impact of coal-fired power plants on lung cancer incident rates / O. Ige, I. Ratnayake, J. Martinez, S. Pepper, A. Alsup, M. McGuirk, B. Gajewski, D. P. Mudaranthakam // Journal of Cancer Epidemiology and Prevention. – 2024. – Vol. 2. – No. 1. – P. 2240–2249. – DOI: 10.1080/28322134.2024.2348469.

170. International Energy Outlook 2016: with Projections to 2040 [Electronic resource] / U.S. Energy Information Administration (EIA). – 2016. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2016).pdf) (дата обращения: 15.10.2024).

171. Investigative post / Report: Tainted soil near Tonawanda Coke – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.investigativepost.org/2019/01/16/report-tainted-soil-near-tonawanda-coke/> (дата обращения: 10.12.2023).

172. Isajenko, K. Radiological assessment of coal fly ash from Polish power and cogeneration plants: Implications for energy waste management / K. Isajenko, B. Piotrowska, M. Szyłak-Szydlowski, M. Reizer, K. Maciejewska, M. Kwestarz // Energies. – 2025. – Vol. 18. – No. 12. – Article 3010. – DOI: 10.3390/en18123010.

173. Kotov, R. The impact of Kuzbass industrial enterprises on environmental safety / R. Kotov, Ya. Formulevich // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 670. – Article 012049. – DOI: 10.1088/1755-1315/670/1/012049.

174. Kuang, Y. Photochemical aqueous-phase reactions induce rapid daytime formation of oxygenated organic aerosol on the North China Plain / Y. Kuang, Y. He, W.

Xu, B. Yuan, G. Zhang, Z. Ma, C. Wu, C. Wang, S. Wang, S. Zhang, J. Tao, N. Ma, H. Su, Y. Cheng, M. Shao // *Environmental Science & Technology*. – 2020. – Vol. 54. – No. 7. – P. 3849–3860. – DOI: 10.1021/acs.est.9b06836.

175. Lee, Y. M. Effects of PM₁₀ on mortality in pure COPD and asthma-COPD overlap: difference in exposure duration, gender, and smoking status / Y. M. Lee, J. H. Lee, H. C. Kim, E. Ha // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10. – Article number 2402. – DOI: 10.1038/s41598-020-59209-7.

176. Leung, K. Environmental impact of heavy metals on the soils and plants around a coke-making factory of Jiyuan city, China / K. Leung. – 2010.

177. Li, X. X. Effect of stable stratification on dispersion within urban street canyons: A large-eddy simulation / X. X. Li, R. Britter, L. K. Norford // *Atmospheric Environment*. – 2016. – Vol. 144. – P. 47–59. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2016.08.060.

178. Liu, K. W. Characteristics and composition of particulate matter from coal-fired power plants / K. W. Liu, M. H. Xu, H. Yao, D. X. Yu, Z. H. Zhang, D. Z. Lu // *Science in China Series E: Technological Sciences*. – 2009. – Vol. 52. – No. 6. – P. 1521–1526. – DOI: 10.1007/s11431-009-0172-7.

179. Liu, Q. Bibliometric analysis on mercury emissions from coal-fired power plants: a systematic review and future prospect / Q. Liu, J. Gao, G. Li, Y. Zheng, R. Li, T. Yue // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31. – No. 13. – P. 19148–19165. – DOI: 10.1007/s11356-024-32369-z.

180. MacEwen, J. D. Experimental oncogenesis in rats and mice exposed to coal tar aerosols / J. D. MacEwen, A. Hall 3rd, L. D. Scheel // *Proceedings of the Seventh Annual Conference on Environmental Toxicology*, 13–15 October 1976, Dayton, OH. – Wright-Patterson Air Force Base, OH: Aerospace Medical Research Laboratory, 1976. – (AMRL Technical Report). – P. 76-125.

181. Marinaite, I. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the atmosphere of the southern Baikal Region (Russia): Sources and Relationship with Meteorological Conditions / I. Marinaite, I. Penner, E. Molozhnikova, M. Shikhovtsev, T. Khodzher // *Atmosphere*. – 2022. – Vol. 13. – No. 3. – Article 420. – DOI: 10.3390/atmos13030420.

182. Mu, L. Emission characteristics of particulates and polycyclic aromatic hydrocarbons from coking processes / L. Mu. – Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. – 180 p.

183. Newman, L. S. Clinical pulmonary toxicology / L. S. Newman // *Clinical Environmental Health and Exposures* / eds. J. B. Sullivan Jr., G. Krieger. – 2nd ed. – Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 2001. – P. 206–223.

184. Pandey, S. K. Coal fly ash: some aspects of characterization and environmental impacts / S. K. Pandey // *Journal of Environmental Science, Computer Science and Engineering & Technology*. – 2014. – Vol. 3. – No. 3. – P. 921–937.

185. Sadique, J. Aerodynamic properties of rough surfaces with high aspect ratio roughness elements: effect of aspect ratio and arrangements / J. Sadique, X. I. A. Yang, C. Meneveau, R. Mittal // *Boundary-Layer Meteorology*. – 2017. – Vol. 163. – No. 2. – P. 203–224. – DOI: 10.1007/s10546-016-0222-1.

186. Sierra-Hernández, M. R. Atmospheric depositions of natural and anthropogenic trace elements on the Guliya ice cap (northwestern Tibetan Plateau) during the last 340 years / M. R. Sierra-Hernández, P. Gabrielli, E. Beaudon, A. Wegner, L. G. Thompson // *Atmospheric Environment*. – 2018. – Vol. 176. – P. 91–102. – DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.11.040.

187. Starodymova, D. P. Winter atmospheric deposition of trace elements in the Arkhangelsk region (NW Russia): Insights into environmental effects / D. P. Starodymova, E. I. Kotova, V. P. Shevchenko, K. V. Titova, O. N. Lukyanova // *Atmospheric Pollution Research*. – 2024. – Vol. 15. – No. 12. – Article 102310. – DOI: 10.1016/j.apr.2024.102310.

188. Su, T. Relationships between the planetary boundary layer height and surface pollutants derived from lidar observations over China: regional pattern and influencing factors / T. Su, Z. Li, R. Kahn // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2018. – Vol. 18. – No. 21. – P. 15921–15935. – DOI: 10.5194/acp-18-15921-2018.

189. Sushil, S. Analysis of fly ash heavy metal content and disposal in three thermal power plants in India / S. Sushil, V. S. Batra // *Fuel*. – 2006. – Vol. 85. – No. 12–13. – P. 2676–2679. – DOI: 10.1016/j.fuel.2006.04.031.

190. The economics of the back end of the nuclear fuel cycle [Electronic resource] / Nuclear Energy Agency (NEA), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). – Paris: OECD Publishing, 2013. – (NEA No. 7061). – 128 p. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/7061-eboec.pdf> (дата обращения: 15.10.2023).

191. Veremchuk, L. V. Impact evaluation of environmental factors on respiratory function of asthma patients living in urban territory / L. V. Veremchuk, K. Tsarouhas, T. I. Vitkina, E. E. Mineeva [et al.] // *Environmental Pollution*. – 2018. – Vol. 235. – P. 489–496. – DOI: 10.1016/j.envpol.2017.12.108.

192. Vig, N. Environmental impacts of Indian coal thermal power plants and associated human health risk to the nearby residential communities: a potential review / N. Vig, R. Khaiwal, S. Mor // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 341. – Article 140103. – DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.140103.

193. Vlasov, D. Dissolved and suspended forms of metals and metalloids in snow cover of megacity: partitioning and deposition rates in western Moscow / D. Vlasov, J. Vasil'chuk, N. Kosheleva, N. Kasimov // *Atmosphere*. – 2020. – Vol. 11. – No. 9. – Article 907. – DOI: 10.3390/atmos11090907.

194. Wei, J. Improved 1 km resolution PM_{2.5} estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees / J. Wei, M. Li, W. Cribb, W. Huang, L. Xue, J. Sun, Y. Guo, J. Peng, A. Li, L. Lyapustin, H. Liu, Y. Wu // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2020. – Vol. 20. – No. 6. – P. 3273–3289. – DOI: 10.5194/acp-20-3273-2020.

195. WHO (2013) Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths / International Agency for Research on Cancer (IARC), World Health Organization (WHO). – Lyon/Geneva: IARC, WHO, 2013.

196. World Steel Association (2023) / *Steel Statistical Yearbook 2023*. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook/> (дата обращения: 21.05.2024).

197. Wu, W. J. Assessment of PM_{2.5} pollution mitigation due to emission reduction from main emission sources in the Beijing–Tianjin–Hebei region / W. J. Wu, X. Chang, J. Xing, S. X. Wang, J. M. Hao // *Huan Jing Ke Xue = Chinese Journal of Environmental Science*. – 2017. – Vol. 38. – No. 3. – P. 867–875.

198. Xu, L. Spatiotemporal pattern of air quality index and its associated factors in 31 Chinese provincial capital cities / L. Xu, J. Zhou, Y. Guo, T. Wu, T. Chen, Q. Zhong, D. Yuan, P. Chen, C. Ou // *Air Quality, Atmosphere & Health*. – 2017. – Vol. 10. – P. 601–609. – DOI: 10.1007/s11869-016-0454-8.

199. Xu, W. Effects of aqueous-phase and photochemical processing on secondary organic aerosol formation and evolution in Beijing, China / W. Xu, T. Han, W. Du, Q. Wang, C. Chen, J. Zhao, Y. Zhang, J. Li, P. Fu, Z. Wang // *Environmental Science & Technology*. – 2017. – Vol. 51. – No. 2. – P. 762–770. – DOI: 10.1021/acs.est.6b04498.

200. Zhu, X. Study on the characteristics of PAHs source profile of coke plant / X. Zhu, Y. Wang, W. Liu, T. Zhu // *Huan Jing Ke Xue = Chinese Journal of Environmental Science*. – 2001. – Vol. 22. – No. 3. – P. 266–269.

201. Zierold, K. M. Exposure to coal ash and depression in children aged 6-14 years old / K. M. Zierold, C. G. Sears, J. V. Myers, G. N. Brock, C. H. Zhang, L. Sears // *Environmental Research*. – 2022. – Vol. 214. – Pt 3. – Article 114005. – DOI: 10.1016/j.envres.2022.114005.

202. Ziniovskaia, I. Application of active biomonitoring technique for the assessment of air pollution by potentially toxic elements in urban areas in the Kemerovo Region, Russia / I. Ziniovskaia, N. Yushin, A. Peshkova, M. Noskov, V. Koshelev, D. Nosov, B. Maksimova, A. Dyakova, P. Apanasevich, E. Dmitrieva // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2025. – Vol. 197. – No. 2. – Article 158. – DOI: 10.1007/s10661-024-13439-8.